

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**CÁLCULO DE LAS EMISIONES  
CONTAMINANTES PRODUCIDAS POR EL  
TRÁFICO RODADO MEDIANTE EL MODELO DE  
DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA CALINE 4**

---

**Proyecto Fin de Carrera – Ingeniería Industrial**

**Departamento de Física**

Autor: **Alejandro Ramos Fernández**  
Directora: **Susana Briz Pacheco**

**Leganés, Octubre 2011**



*A mi familia*





## Agradecimientos

En los siguientes párrafos quiero recoger mis más sinceras palabras de agradecimiento a aquellas personas que tanto me han apoyado a lo largo de mi aventura universitaria en general, y en la realización de este proyecto en particular.

En primer lugar quiero dar las gracias a mi Directora de Proyecto, Susana Briz Pacheco, por su fenomenal trato a lo largo de estos meses, su cariñosa acogida dentro del departamento de Física y por su constante apoyo desde el primer día en el que empezamos a trabajar juntos.

También quiero agradecer de manera general a todos los profesores y compañeros con los cuales he compartido mis estudios en la Universidad Carlos III de Madrid, sobre todo los que estuvieron conmigo desde el principio, por los buenos momentos vividos.

Por supuesto a todos aquéllos con los que compartí un maravilloso e inolvidable año en la Universidad Tecnológica de Tampere, en Finlandia; país que me marcó para siempre, no precisamente por el frío, sino por una persona especial que desde entonces siempre está a mi lado.

Por último, el apoyo más importante, el de mi familia. Muchas gracias a mis padres, Juan y María, y a mis hermanos, Rosa María, Juan Carlos y David. Sin ellos nada de esto hubiera sido posible y ahora es mi turno de devolverles ese apoyo en forma del más grande de los agradecimientos.

A todos, muchas gracias.





## Resumen

Este Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivo fundamental la evaluación de la sensibilidad del modelo de dispersión atmosférica CALINE4, para su utilización en el cálculo de los factores de emisión y las emisiones contaminantes procedentes del tráfico rodado. Se trata con este trabajo de establecer cuáles son los parámetros de entrada al modelo que afectan en mayor medida al cálculo de las emisiones, para así favorecer futuros estudios e investigaciones dentro de este campo.

Además, se estudia la aplicabilidad de la metodología Europea EMEP/CORINAIR a escalas temporales y espaciales reducidas. El objetivo es la obtención del factor de emisión y las emisiones de una carretera de la Comunidad de Madrid mediante la aplicación de esta metodología a datos experimentales medidos 'in situ' en dicha vía.

## Abstract

This work has as main objective the evaluation of the sensibility of CALINE4, an atmospheric dispersion model, for its use in the calculation of emission factors and pollutant emissions from road traffic. It is important to establish the input parameters for the model that most affect the emissions, in order to help future researches or studies within this field.

In addition, in this paper the reader can find a study for the applicability of the European methodology EMEP/CORINAIR in reduced spatial and temporal scales. This study is made with the aim of obtaining the emission factor and emissions of a road in the Madrid Region through the application of this methodology to experimental data measured in this area.







# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>3. CONTAMINANTES PROCEDENTES DEL TRÁFICO RODADO Y SU DISPERSIÓN EN LA ATMÓSFERA.....</b>	<b>11</b>
3.1 Monóxido de carbono .....	12
3.2 Óxidos de nitrógeno.....	13
3.3 Hidrocarburos .....	13
3.4 Transporte y dispersión de contaminantes en la capa límite atmosférica .....	14
<b>4. MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>19</b>
4.1 Aplicación de los modelos de dispersión atmosférica.....	20
4.2 Clasificación de los modelos de dispersión atmosférica .....	21
4.3 CALINE 4.....	24
4.3.1 Fundamentos del modelo .....	25
4.3.2 Introducción a la ejecución de CALINE4 .....	31
4.3.2.2 Introducción de los datos de entrada.....	32
4.3.2.3 Ejecución y resultados.....	43
4.3.3 Cálculo del factor de emisión. EMFAC2007 .....	45
4.3.3.1 Introducción a la ejecución de EMFAC2007.....	47
<b>5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE DISPERSIÓN A LOS PARÁMETROS DE ENTRADA (I).....</b>	<b>55</b>
5.1 Descripción del escenario de estudio .....	56
5.1.1 Instrumentación utilizada en la campaña de medidas .....	58
5.1.1.1 Sistema de Caracterización del Tráfico .....	59
5.1.1.2 Estación meteorológica .....	59
5.1.1.3 Sistema Airpointer .....	60
5.1.1.4 Sistema Open-Path FTIR .....	62
5.2 Datos de entrada .....	64
5.2.1 EMFAC2007 .....	64
5.2.2 CALINE4.....	67



5.3 Resultados del Análisis de Sensibilidad.....	71
5.3.1 Velocidad de los vehículos .....	75
5.3.2 Dirección del viento .....	80
5.3.3 Volumen de tráfico.....	84
5.3.4 Velocidad del viento.....	88
5.3.5 Longitud del "link" .....	95
5.3.6 Influencia de un carril sobre el resto .....	101
5.3.7 Factor de emisión .....	105
<b>6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE DISPERSIÓN A LOS PARÁMETROS DE ENTRADA (II).....</b>	<b>109</b>
6.1 Altura de los receptores .....	111
6.2 Dirección del viento.....	113
6.3 Velocidad del viento.....	116
6.4 Longitud del "link".....	121
<b>7. INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA EMEP/CORINAIR.....</b>	<b>131</b>
7.1 Objetivos de la Metodología .....	132
7.2 COPERT4.....	133
7.2.1 Ejecución y resultados.....	134
7.3 Aplicación de la metodología EMEP/CORINAIR a escalas temporales y espaciales reducidas .....	142
7.3.1 Introducción de los datos de entrada en COPERT4.....	142
7.3.2 Resultados.....	147
7.3.2.1 Diesel vs. Gasolina.....	150
7.3.2.2 Análisis del Factor de Emisión .....	153
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>155</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>161</b>
ANEXO I. ....	167
ANEXO II. ....	169



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Partículas PM <sub>2,5</sub> y su riesgo para la salud.....	4
Figura 3-1: Fenómeno de inversión térmica.....	16
Figura 3-2: Nube de contaminación sobre la ciudad de Madrid. Octubre 2010. ....	16
Figura 4-1: Fundamentos del modelo Gaussiano .....	22
Figura 4-2: Series de elementos usados en CALINE4.....	26
Figura 4-3: Fuentes lineales finitas equivalentes para diferentes tamaños de elemento y ángulos de viento.....	27
Figura 4-4: Subelementos .....	28
Figura 4-5: Zona de mezcla .....	29
Figura 4-6: Geometría del link.....	30
Figura 4-7: Vista principal de CL4 .....	32
Figura 4-8: Pantalla Link Geometry de CL4 .....	36
Figura 4-9: Altura para diferentes tipos de link.....	38
Figura 4-10: Pantalla Link Activity de CL4 .....	39
Figura 4-11: Pantalla Run Conditions de CL4 .....	42
Figura 4-12: Pantalla Receptor Positions de CL4 .....	43
Figura 4-13: Archivo de resultados de CL4 .....	44
Figura 4-14: Vista general de EMFAC2007 .....	47
Figura 4-15: Primera pantalla de introducción de datos de EMFAC2007 .....	49
Figura 4-16: Segunda pantalla de introducción de datos de EMFAC2007.....	50
Figura 4-17: Pantalla de modelización de EMFAC2007.....	52
Figura 4-18 (izquierda): Pantalla de introducción de la velocidad de los vehículos ..	53
Figura 4-19 (derecha): Pantalla de introducción de la temperatura ambiente.....	53
Figura 4-20: Archivo RTL de resultados de EMFAC2007 .....	54
Figura 5-1: Imagen real de la carretera objeto de estudio.....	57
Figura 5-2: Localización de la carretera objeto de estudio .....	57
Figura 5-3: SCT dispuesto en la pasarela sobre la carretera de estudio .....	59
Figura 5-4: Estación meteorológica instalada sobre la pasarela .....	60
Figura 5-5: Estación meteorológica instalada sobre la pasarela .....	61
Figura 5-6 Sistema FTIR sobre telescopio .....	63



Figura 5-7 Sistema Open-Path (FTIR + fuente IR).....	63
Figura 5-8: Esquema de la disposición del link y los receptores .....	70
Figura 5-9: Porcentaje de cambio de los resultados por la variación de cada uno de los parámetros de entrada. ....	72
Figura 5-10: Ratio de concentraciones de NO <sub>x</sub> previstas frente a experimentales en función de la dirección del viento, utilizando CALINE4 .....	74
Figura 5-11: Ratio de concentraciones de NO <sub>x</sub> previstas frente a experimentales en función de la dirección del viento, utilizando CAR-FMI 3.0 .....	74
Figura 5-12: Factor de emisión (g/milla) para el CO en función de la velocidad de los vehículos (km/h).....	77
Figura 5-13: Concentración de CO en función de la velocidad de los vehículos .....	80
Figura 5-14: Sistema de coordenadas para la dirección del viento.....	81
Figura 5-15: Concentración de CO en función de la dirección del viento.....	82
Figura 5-16: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 137° .....	86
Figura 5-17: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 180° .....	87
Figura 5-18: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137° .....	91
Figura 5-19: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137° .....	92
Figura 5-20: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 180° .....	94
Figura 5-21: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para una dirección del viento de 137° .....	97
Figura 5-22: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 137° .....	98
Figura 5-23: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para una dirección del viento de 180° .....	100
Figura 5-24: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180° .....	100
Figura 5-25: Concentración de CO en función del primer carril .....	104



Figura 5-26: Concentración de CO en función del tercer carril .....	105
Figura 6-1: Esquema de la disposición del link y los receptores en el nuevo escenario de estudio .....	110
Figura 6-2: Concentración de CO en función de la altura de los Receptores B .....	112
Figura 6-3: Concentración de CO en función de la dirección del viento para los Receptores B .....	115
Figura 6-4: Esquema de la dirección del viento establecida en este apartado (223°) con respecto a la anterior (137°) .....	117
Figura 6-5: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 223°).....	118
Figura 6-6: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 180°).....	120
Figura 6-7: Esquema de la dispersión de los contaminantes con una dirección del viento de 223° .....	122
Figura 6-8: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para los Receptores B (Dirección del viento: 223°) .....	123
Figura 6-9: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para los Receptores B (Dirección del viento: 223°) .....	124
Figura 6-10: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para los Receptores B (Dirección del viento: 180°) .....	126
Figura 6-11: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para los Receptores B (Dirección del viento: 223°) .....	127
Figura 7-1: Logo de COPERT4 .....	133
Figura 7-2: Vista de la pantalla principal de COPERT4 .....	134
Figura 7-3: Herramienta "Run Wizard" de COPERT4 .....	135
Figura 7-4: Pantalla "Select Country and Year" de COPERT4 .....	136
Figura 7-5: Pantalla "Country Info" de COPERT4 .....	137
Figura 7-6: Pantalla "Fuel Information" de COPERT4 .....	138
Figura 7-7: Pantalla "Vehicles / Activity Data" de COPERT4 .....	139
Figura 7-8: Pantalla "Input Fleet Data" de COPERT4 .....	140
Figura 7-9: Pantalla "Input Circulation Data" de COPERT4 .....	140
Figura 7-10: Pantalla "Total Emissions" de COPERT4 .....	141





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1: Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill .....	40
Tabla 4-2: Correspondencia entre las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill y Turner .....	41
Tabla 5-1: Factor de emisión en función de la velocidad de los vehículos para diferentes tipos de contaminante .....	76
Tabla 5-2: Concentración de CO en función de la velocidad de los vehículos.....	79
Tabla 5-3: Concentración de CO en función de la dirección del viento.....	83
Tabla 5-4: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 137° .....	85
Tabla 5-5: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 180° .....	87
Tabla 5-6: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137° .....	90
Tabla 5-7: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137° .....	92
Tabla 5-8: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 180° .....	94
Tabla 5-9: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para una dirección del viento de 137° .....	96
Tabla 5-10: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 137° .....	97
Tabla 5-11: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para una dirección del viento de 180° .....	99
Tabla 5-12: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180° .....	99
Tabla 5-13: Concentración de CO en función del carril utilizado en el estudio .....	104
Tabla 5-14: Análisis de sensibilidad del factor de emisión en función de la caracterización del tráfico. ....	107
Tabla 6-1: Concentración de CO en función de la altura de los Receptores B .....	112



Tabla 6-2: Concentración de CO en función de la dirección del viento para los Receptores B .....	114
Tabla 6-3: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 223°).....	118
Tabla 6-4: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 180°).....	120
Tabla 6-5: Comparación entre los resultados obtenidos las dos configuraciones...	121
Tabla 6-6: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para una dirección del viento de 223° .....	123
Tabla 6-7: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 223° .....	124
Tabla 6-8: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo) para una dirección del viento de 180° .....	126
Tabla 6-9: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180° .....	127
Tabla 6-10: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180° .....	128
Tabla 6-11: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180° .....	128
Tabla 7-1: Temperatura y Presión de Vapor Reid horaria.....	143
Tabla 7-2: Estadísticas parque automovilístico por tipo de combustible .....	144
Tabla 7-3: Estadísticas del parque automovilístico por tipo de vehículo y de combustible.....	146
Tabla 7-4: Número de vehículos por tipo .....	146
Tabla 7-5: Número de vehículos y kilometraje por tipo .....	147
Tabla 7-6: Emisiones de CO (g/hora).....	148
Tabla 7-7: Límite de emisiones de CO según la normativa europea.....	149
Tabla 7-8: Número de vehículos y porcentajes por tipo de combustible .....	151
Tabla 7-9: Número de vehículos por tipo .....	151
Tabla 7-10: Emisiones de CO (g/hora).....	152
Tabla 7-11: Factor de emisión para el CO (g/milla) calculado mediante EMFAC2007 y COPERT4 .....	153





# 1. INTRODUCCIÓN

El impacto de la contaminación atmosférica se ha convertido durante las últimas décadas en un tema de vital importancia para el ser humano y el medio ambiente. En Europa, se vienen realizando grandes esfuerzos con el objetivo de reducir la contaminación del aire y, en especial, los efectos adversos de los contaminantes atmosféricos. En este sentido, la contaminación procedente de las fuentes industriales y del tráfico rodado es especialmente importante, ya que su volumen está aumentando considerablemente cada año (Slezakova et al, 2011).

Dentro de las ciudades de los países desarrollados, un gran porcentaje de la contaminación atmosférica está provocada por las emisiones de gases contaminantes procedentes del tráfico rodado. Concretamente, Monzón et al (1999) establecieron en su estudio sobre los niveles de contaminación del aire en la ciudad de Madrid que, en las grandes áreas urbanas españolas, alrededor del 90% de las emisiones de monóxido de carbono (CO) proceden de las fuentes móviles y, en el caso de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), este porcentaje es de aproximadamente el 75%. Estos datos podrían verse incrementados con el establecimiento de nuevos asentamientos urbanos en los alrededores de las ciudades y con el aumento de la tasa de motorización.

Para poder paliar los efectos negativos que los altos niveles de contaminación procedente del tráfico están provocando en la atmósfera, es necesario adoptar soluciones tecnológicas que reduzcan y controlen las emisiones de gases nocivos que se derivan de los vehículos. En la actualidad existen ya numerosas técnicas y dispositivos desarrollados con este propósito y que se podrían clasificar atendiendo a cada una de las etapas de la siguiente secuencia: precombustión, combustión y postcombustión.



Dentro de la etapa de precombustión se hace referencia fundamentalmente al tipo de combustible que los vehículos utilizan para funcionar. En este sentido, las alternativas que se están planteando actualmente como combustible son diversas y todas comparten como característica principal un mayor rendimiento energético, lo cual conlleva una reducción considerable de las emisiones contaminantes. Algunos de estos nuevos combustibles se nombran a continuación:

- Gas Licuado de Petróleo
- Gas Natural
- Metanol
- Etanol
- Biodiesel líquido
- Hidrógeno

La siguiente etapa en la que se desarrollan técnicas para el control de las emisiones contaminantes es la combustión producida en el motor de los vehículos. Actualmente existen diferentes tecnologías que permiten al motor producir una combustión más limpia, reduciendo de ese modo la producción de gases nocivos. El objetivo fundamental de todas ellas es, por tanto, proporcionar al motor un mejor rendimiento, permitiendo que éste reciba solamente la cantidad justa de combustible que necesita. Los dispositivos más utilizados recientemente en la industria del automóvil con este propósito son los sistemas de inyección e ignición electrónica y la unidad electrónica de control del motor.

Además de la tecnología aplicada a la consecución de una combustión más limpia dentro del motor de los vehículos, existen otros métodos que persiguen el mismo objetivo y que hacen referencia al manejo del vehículo o al diseño del mismo. Por ejemplo, el menor peso y la menor resistencia al aire de los diseños vehiculares favorecen el menor consumo de combustible y la consiguiente reducción en las emisiones producidas.

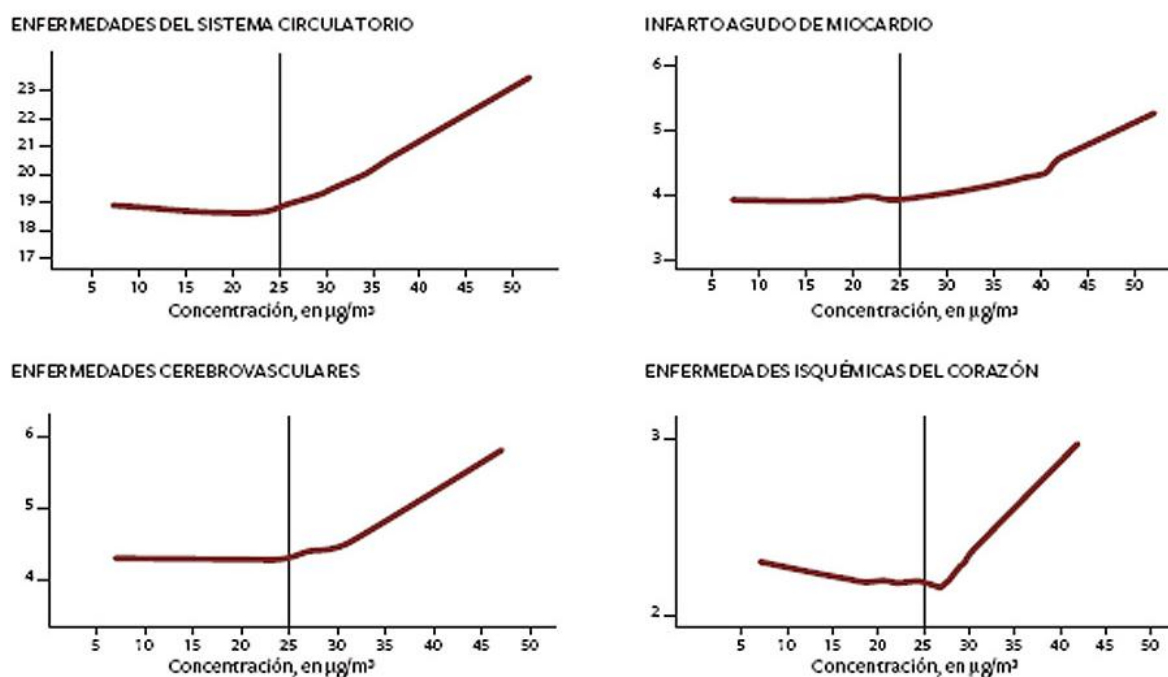


Por último, resulta interesante mencionar la importancia de aquellos dispositivos encargados de reducir las emisiones a la atmósfera de gases contaminantes producidos en la combustión de los vehículos. Uno de los sistemas más eficaces en este sentido es el uso de filtros o trampas de partículas regenerables en los motores. Estos dispositivos son capaces de retener hasta un 90% de partículas nocivas para el medio ambiente y ya se utilizan en la fabricación de algunos vehículos, especialmente aquéllos destinados al transporte público. El catalizador es otro de los dispositivos desarrollados para controlar las emisiones contaminantes de los vehículos, produciendo modificaciones químicas que reducen el porcentaje de ciertos gases nocivos procedentes de la combustión antes de ser emitidos al exterior.

Una vez que los contaminantes son emitidos a la atmósfera, resulta de verdadera importancia analizar sus efectos perjudiciales en el medio ambiente y en la salud de los seres humanos. Diversos estudios, como el realizado por Tapia (1998), establecen que los vehículos de motor son la fuente principal de emisiones contaminantes en los grandes núcleos urbanos y que, debido principalmente al tráfico, más de 1.000 millones de residentes en grandes ciudades sufren niveles de contaminación considerados inadmisibles por la Organización Mundial de la Salud. Desde el episodio de alta contaminación atmosférica ocurrido en Londres en diciembre de 1952 al que se atribuyen entre 3.500 y 4.000 defunciones (Wilkins, 2006), se sabe que la contaminación aumenta la mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Las investigaciones de la relación entre mortalidad y contaminación atmosférica muestran una relación lineal con ausencia de umbral, sin que parezca haber un nivel mínimo por debajo del cual la contaminación atmosférica no tenga efectos nocivos. Según datos de la Unión Europea, las emisiones contaminantes del tráfico provocan la muerte prematura de aproximadamente 16.000 personas en España cada año por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, que se sitúan entre las primeras causas de muerte en los países occidentales.

El tráfico es el principal emisor de polución en ámbitos urbanos, donde se concentra la mayor parte de la población y, tal y como se está viendo, sus efectos nocivos en la salud son evidentes. Concretamente, el CO es un gas que produce graves perjuicios en el sistema cardiovascular de los seres humanos, especialmente en aquellos individuos con un mayor factor de riesgo como los niños, los ancianos o los pacientes con problemas del corazón o respiratorios, pudiendo ser realmente peligroso en altas concentraciones. Por su parte, las partículas en suspensión están detrás de numerosas enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares y cánceres de pulmón. En concreto, las partículas con un diámetro de menos de 10 micrómetros, o PM10, pueden acceder a la parte superior del tracto respiratorio; mientras que las partículas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro, también llamadas partículas finas o PM2,5, llegan hasta los pulmones, por lo que son potencialmente más peligrosas. Las partículas aún más pequeñas, de menos de un nanómetro de diámetro pueden entrar incluso en la circulación sanguínea. En la figura 1-1 se ilustran diferentes gráficas que explican el riesgo que suponen las partículas en suspensión PM2,5 para la salud del ser humano.



**Figura 1-1: Partículas PM2,5 y su riesgo para la salud**

Fuente: Web [5]



Dada la importancia que el problema de la contaminación atmosférica procedente del tráfico supone actualmente, es necesario mantener un estricto control sobre las emisiones contaminantes de modo que se puedan paliar sus negativas consecuencias. En este sentido, la Unión Europea ha venido adoptando a lo largo del tiempo un conjunto de disposiciones jurídicas que requieren, a los Estados Miembros, la elaboración de sistemas de información sobre inventarios de emisiones y la elaboración de proyecciones de la evolución futura de contaminantes en la atmósfera bajo distintos escenarios.

Dentro de este marco europeo de actuación, en España existe el Centro Nacional de Referencia sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), que desarrolla labores de coordinación e intercambio de información con los órganos europeos responsables y dispone de una amplia base de datos de calidad del aire y del inventario de emisiones a nivel nacional.

El inventario desarrollado por este centro es el proyecto CORINE-AIRE, elaborado cada año y enmarcado dentro del proyecto europeo EMEP/CORINAIR, el cual será explicado más adelante en este trabajo. Su objetivo es la estimación de las emisiones de contaminantes a la atmósfera, dentro del conjunto del territorio nacional, permitiendo conocer la evolución temporal de las emisiones, diseñar políticas medioambientales, proporcionar información a los organismos competentes en materia de contaminación ambiental y hacer frente a los compromisos nacionales e internacionales que España ha asumido en lo relativo a contaminación atmosférica.

Este proyecto fin de carrera se enmarca dentro de una línea de investigación sobre las emisiones del tráfico en la que el Laboratorio de Sensores, Teledetección e Imagen en el Infrarrojo (LIR) del Departamento de Física de la Universidad Carlos III de Madrid lleva trabajando desde el año 2006, momento en el cual se concedió el proyecto de investigación "*Evaluación 'in situ' de las emisiones de contaminantes*



*atmosféricas asociadas al tráfico rodado mediante teledetección infrarroja. Una metodología basada en la técnica Open-Path FTIR".*

El objetivo fundamental del proyecto de investigación del LIR es la determinación experimental de emisiones gaseosas asociadas al tráfico rodado utilizando la técnica de detección remota de gases por espectrometría infrarroja basada en técnicas de análisis de Fourier (Espectrometría Open-Path FTIR). Esta técnica conlleva las ventajas inherentes a una técnica de medida no intrusiva, evitando la toma de muestras gaseosas en recipientes especiales y proporcionando concentraciones promediadas a lo largo de una 'línea de medida' definida. Además, la técnica ofrece como ventaja importante la capacidad de calcular simultáneamente la concentración de todos los gases de interés a partir de una misma medida.

La determinación experimental de las emisiones se fundamenta en la medida 'in situ' de parámetros asociados a las emisiones y puede realizarse mediante dos métodos, cuyas capacidades se vienen explorando en la mencionada línea de investigación del LIR.

El cálculo de las emisiones del tráfico puede hacerse a partir de los propios datos de tráfico (volumen, tipo, velocidad) medidos en la vía cuyas emisiones se quieren caracterizar y aplicando la metodología de cálculo propuesta en el programa CORINE-AIRE. Para validar este método, se aplica un procedimiento indirecto que consiste en aplicar a los factores de emisión así calculados un modelo de dispersión de contaminantes, que proporciona las concentraciones esperables en un punto (o varios). Las concentraciones obtenidas mediante el modelo de dispersión se comparan con las concentraciones medidas en dicho punto para validar las emisiones obtenidas de los datos de tráfico y la metodología CORINE-AIRE.

Las emisiones de tráfico también se pueden obtener mediante la aplicación inversa de un modelo de dispersión atmosférica a las concentraciones medidas experimentalmente en las proximidades de la vía que se quiere caracterizar.



Evidentemente ambos métodos se fundamentan en la validez del modelo de dispersión atmosférica, por lo que resulta indispensable la realización de un estudio de validación dentro del problema concreto en que va a ser utilizado.

En un estudio previo (Gali, 2008) se analizaron varios modelos de dispersión (AERMOD, ISCST3, CALINE-4, etc.) de los cuales se eligió el modelo CALINE4 por ser un modelo sencillo, específico para el estudio de vías de tráfico y por resolver el problema de la dispersión de contaminantes a microescala, es decir, en puntos muy cercanos a la fuente emisora, como es el caso que nos ocupa.

De forma general, se puede decir que este modelo calcula las concentraciones de un determinado contaminante en el punto requerido (receptor) a partir de los factores de emisión de la fuente de contaminación, de parámetros geométricos de la carretera y del receptor y de variables meteorológicas.

Aunque el objetivo general de la línea de investigación del LIR es relacionar los factores de emisión con las concentraciones observadas en un punto para verificar sus dos metodologías de cálculo de emisiones, es evidente la necesidad de evaluar el impacto del resto de los parámetros de entrada en las concentraciones calculadas. De este modo se podrá determinar en qué condiciones se puede aplicar las metodologías con suficientes garantías y cuál es la configuración geométrica apropiada.

Precisamente este es el propósito general de este proyecto fin de carrera, determinar la sensibilidad del modelo de dispersión atmosférica CALINE4 a los parámetros de entrada.

Los objetivos de este proyecto se detallan en el capítulo 2. En el capítulo 3 se exponen brevemente los conceptos fundamentales de la dispersión de contaminantes, en los que se basa el modelo CALINE4, que será explicado en el capítulo 4. El análisis de sensibilidad de la configuración propuesta inicialmente se desarrolla en el capítulo 5. A partir de las conclusiones de este estudio de



sensibilidad, en el capítulo 6 se propondrá y analizará una configuración experimental alternativa. En el capítulo 7, se estudiará la posibilidad de aplicar la metodología propuesta en el programa CORINE-AIRE a escalas de tiempo más reducidas. Por último, en el capítulo 8, se expondrán las principales conclusiones de este proyecto fin de carrera.





## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es la evaluación de la sensibilidad del modelo de dispersión atmosférica CALINE4 a sus parámetros de entrada. Como se ha mencionado anteriormente, estos parámetros de entrada son fundamentalmente los factores de emisión de los vehículos que circulan así como las características geométricas de la vía y las variables meteorológicas. Así, este objetivo principal puede desdoblarse en varios:

- a) Determinar el impacto que tienen parámetros característicos del tráfico (volumen, velocidad, etc.) sobre los factores de emisión y, a partir de ello, del modelo de dispersión en las concentraciones observables en un determinado punto.
- b) Evaluar la influencia de las características geométricas de la carretera y de los receptores en las concentraciones esperables en éstos.
- c) Establecer el efecto que las condiciones meteorológicas, tales como la velocidad y la dirección del viento, tienen sobre las concentraciones observables.

Dado que para la metodología del cálculo experimental de emisiones se ha propuesto un escenario real con una configuración de carretera y observador determinada, con este análisis de sensibilidad se verificará la aplicabilidad del modelo y la influencia de los parámetros geométricos y meteorológicos, dadas las condiciones específicas propuestas, en la concentración de los contaminantes procedentes del tráfico rodado dentro de la vía en estudio, lo que permitirá conseguir otro de los objetivos de este proyecto:



- d) Determinar si la configuración utilizada es la más adecuada o si por el contrario se podrían proponer configuraciones alternativas para la disposición de los receptores de modo que se pueda cuantificar con mayor precisión, en futuras campañas de medidas, la concentración de contaminantes procedentes de los vehículos que circulan por el tramo de vía específico para calcular o verificar el cálculo de emisiones.

Conviene recordar que el cálculo de emisiones tiene carácter experimental, porque los datos en los que se fundamenta se obtienen experimentalmente 'in situ' en la vía de estudio. Pues bien, el análisis de sensibilidad objetivo principal de este proyecto, permitirá definir otro objetivo:

- e) Definir los requerimientos que los instrumentos de medida que componen el sistema experimental deben cumplir para proporcionar los datos de entrada con suficiente precisión.

Por último, este trabajo trata de analizar, en primera aproximación, la aplicabilidad de la metodología europea EMEP/CORINAIR a escalas espacio-temporales reducidas. La mencionada metodología está destinada al cálculo de inventarios de emisiones a escala nacional dentro de un horizonte temporal de medidas mínimo de un año, pero el objetivo aquí es verificar su posible utilización en la obtención del factor de emisión y las emisiones de una carretera determinada a partir de datos experimentales medidos 'in situ' en dicha vía.



### 3. CONTAMINANTES PROCEDENTES DEL TRÁFICO RODADO Y SU DISPERSIÓN EN LA ATMÓSFERA

Los gases nocivos que emiten los vehículos son el resultado de una combustión imperfecta dentro del motor. Una combustión es considerada imperfecta cuando una parte del combustible que reacciona se oxida en grado inferior al máximo. El hecho de obtener este tipo de combustión se debe a dos causas distintas desde el punto de vista práctico:

- a) La cantidad de aire introducido en la cámara de combustión es insuficiente para conseguir una combustión perfecta.
- b) La cantidad de aire es en sí suficiente, pero el aire se pone en contacto con el combustible de forma insuficiente.

En el caso ideal de una combustión perfecta, en la cual todos los componentes del combustible, al reaccionar, se oxidan al máximo, las emisiones fundamentales producidas por el motor serían las siguientes:

- **Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ):** El  $\text{CO}_2$  es un gas incoloro e inodoro que se encuentra dentro de la atmósfera de la Tierra. No resulta nocivo para los seres vivos y constituye una fuente de alimentación para las plantas, gracias a la fotosíntesis. Sin embargo, está considerado como el más importante de entre todos los gases de efecto invernadero, dado el incremento de las emisiones procedentes de la actividad humana en las últimas décadas.
- **Vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ):** Se trata de un elemento natural de la atmósfera.



Sin embargo, y debido a la ya mencionada combustión imperfecta, el motor de los vehículos genera otro tipo de gases que, aun estando presente en pequeñas proporciones, son muy perjudiciales para la salud de los seres vivos y el medio ambiente. En particular, los principales gases nocivos presentes en las emisiones procedentes de los vehículos son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) y los hidrocarburos. En este proyecto los cálculos se han centrado en el CO, aunque la metodología propuesta es perfectamente aplicable al cálculo de las emisiones del resto de gases contaminantes.

### 3.1 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas venenoso producido por una combustión realizada con escasez de oxígeno. Se trata de uno de los tóxicos más importantes relacionados con la actividad humana, produciéndose básicamente en la combustión de gasolina, queroseno, carbón o madera, si ésta no se desarrolla adecuadamente. Es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera, alcanzando concentraciones de aproximadamente el 50%, que son debidas fundamentalmente a las emisiones procedentes del tráfico rodado. En un vehículo, la aparición de mayores concentraciones en el escape de CO indica la existencia de una mezcla inicial rica o falta de oxígeno.

Según la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (EPA, Web [1]), el monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro y altamente tóxico. Debido a tales características, puede resultar mortal cuando se respira en concentraciones superiores al 0,3% en volumen. De hecho, el monóxido de carbono, en concentraciones altas y tiempos largos de exposición puede provocar en la sangre la transformación irreversible de la Hemoglobina, molécula encargada de transportar el oxígeno desde los pulmones a las células del organismo, en Carboxihemoglobina, incapaz de cumplir esa función (Jaimes et al, 1990).



## 3.2 Óxidos de nitrógeno

El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) constituyen dos de los óxidos de nitrógeno más importantes dado su alto nivel de toxicidad. Algunos expertos creen que el NO<sub>2</sub> es el representante fundamental de los óxidos de nitrógeno, ya que el NO se convierte rápidamente en NO<sub>2</sub>. Sin embargo, otros creen que debido a su participación en la formación del ozono (O<sub>3</sub>), tanto el NO como el NO<sub>2</sub> deben ser considerados individualmente dentro de este conjunto.

En general, los óxidos de nitrógeno son gases con graves efectos nocivos sobre el sistema respiratorio. Son causantes también de efectos nocivos indirectos, ya que contribuyen a formar partículas de origen fotoquímico, causantes de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. En combinación con los hidrocarburos contenidos en las emisiones procedentes del tráfico y con la humedad del aire, los óxidos de nitrógeno producen ácidos nitrosos, que posteriormente caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida, llegando a contaminar áreas situadas a cientos de kilómetros del lugar de origen de las emisiones.

## 3.3 Hidrocarburos

Los hidrocarburos, dependiendo de su estructura molecular, presentan diferentes efectos nocivos. Generalmente, bajo la acción de los rayos solares y en presencia de óxidos de nitrógeno, reaccionan produciendo ozono, un gas oxidante que provoca casos de irritación en ojos y mucosas.

El benceno, por ejemplo, es venenoso por sí mismo, y la exposición a este gas provoca irritaciones de piel y ojos, siendo además uno de los múltiples causantes de cáncer. En las emisiones procedentes del tráfico, su presencia se debe a los componentes incombustibles de la mezcla o a las reacciones intermedias del proceso de combustión, las cuales son también responsables de la producción de Aldehídos y Fenoles.



### **3.4 Transporte y dispersión de contaminantes en la capa límite atmosférica**

Una vez los contaminantes han sido emitidos a la atmósfera, el viento y los procesos de mezcla turbulenta que se dan en ella se encargan de dispersarlos, originando que éstos alcancen puntos muy alejados de su lugar de origen, a veces cientos de kilómetros. Estos procesos de transporte y difusión de contaminantes son precisamente los que pretenden simular los modelos de dispersión para predecir los niveles de concentración de un contaminante producidos por una fuente emisora. En este apartado se van a resumir los procesos más importantes relacionados con la dispersión de contaminantes.

La capa límite atmosférica (CLA) se define como la sección de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre. Generalmente, se considera que en la CLA el flujo es completamente turbulento, de manera que en cualquier punto de ella se observan típicamente variaciones bruscas en el valor de la velocidad, la presión, la temperatura o la humedad del aire. El efecto de la fricción superficial, el calentamiento del suelo y la evaporación se transmite a toda la CLA de forma rápida y eficiente como consecuencia del mecanismo de mezcla turbulenta.

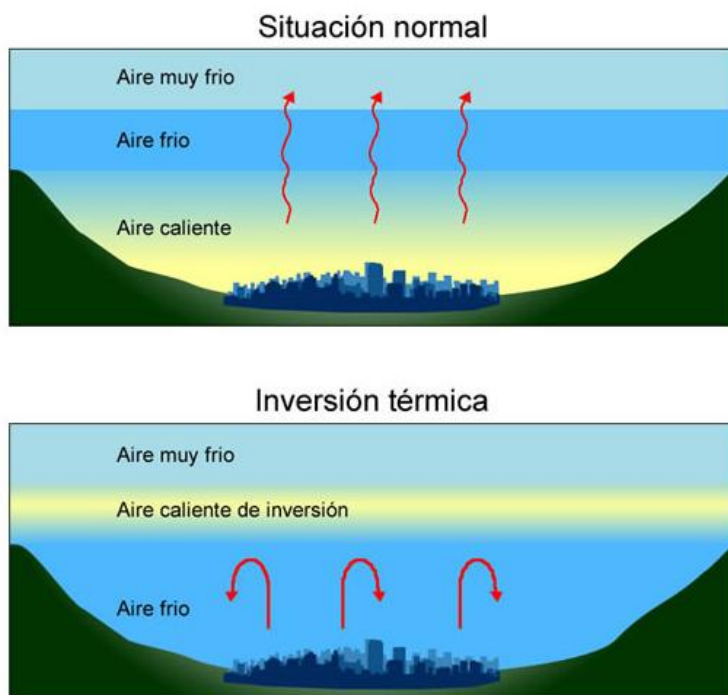
Concretamente, en el caso que aquí se trata, la CLA se corresponde con aquella región directamente influenciada por la presencia de los gases contaminantes procedentes del tráfico. Esta capa abarca sólo una pequeña fracción de la atmósfera, ya que su espesor varía típicamente entre alrededor de 30 y 3.000 m, aunque su nivel se ve influenciado por las características de la superficie del terreno en una región determinada (Castro et al, 1991).

A nivel local, la EPA establece que los principales factores que afectan al transporte y la dispersión de los contaminantes dentro de la CLA son el viento y la estabilidad atmosférica.



El viento se produce cuando el aire caliente asciende y el aire frío se mueve para ocupar su lugar. Este movimiento es causado por las diferencias de presión en la atmósfera, la cual hace referencia al peso de la misma en un momento dado. De esta manera, la variación en la presión hace que el aire se mueva desde las zonas de alta presión a las zonas de baja presión, hecho que da lugar a la presencia del viento. La velocidad del viento puede afectar en gran medida a la concentración de contaminantes dentro de una región. Cuanto mayor sea dicha velocidad, menor será la concentración puesto que el viento diluye los contaminantes y los dispersa rápidamente dentro del área más cercana a la fuente.

Por su parte, la estabilidad atmosférica se refiere al movimiento vertical de la atmósfera. Normalmente, el aire cercano a la superficie terrestre está más caliente durante el día debido a la absorción de energía infrarroja (IR) emitida por la Tierra. De esta forma, este aire más caliente y ligero se eleva y se mezcla con el aire más frío y pesado situado en la atmósfera superior, provocando condiciones atmosféricas inestables. Por lo general, dentro de una región determinada se tienen condiciones atmosféricas estables cuando el aire caliente está por encima del aire frío y la altura de la zona de mezcla queda limitada de manera significativa. Este estado se denomina inversión térmica y consigo conlleva que los contaminantes liberados en la capa más baja de la atmósfera se queden allí atrapados, pudiendo ser removidos sólo por fuertes vientos horizontales. Debido a que los sistemas de alta presión se combinan a menudo con el efecto de la inversión térmica, y en presencia de una velocidad del viento baja, el prolongado tiempo de residencia de los contaminantes dentro de una región específica da lugar a episodios graves de nubes de contaminación (esmog) dentro de la CLA. En la figura 3-1 se muestra una ilustración que explica la formación del fenómeno de inversión térmica mientras que en la figura 3-2 se puede observar un ejemplo real de nube de contaminación sobre la ciudad de Madrid.



**Figura 3-1: Fenómeno de inversión térmica**

Fuente: Web [2]



**Figura 3-2: Nube de contaminación sobre la ciudad de Madrid.  
Octubre 2010.**

Fuente: Web [3]





La dispersión de los contaminantes se encuentra también influenciada por la cantidad de turbulencia presente en la atmósfera más cercana a la fuente. La turbulencia puede ser creada tanto por el movimiento horizontal como por el vertical de la atmósfera. Otros factores meteorológicos básicos que afectan a la concentración de los contaminantes en el ambiente son la radiación solar, las precipitaciones y la humedad. La radiación solar contribuye a la formación de ozono y otros contaminantes secundarios en el aire. Por su parte, la humedad y las precipitaciones también pueden favorecer la creación de contaminantes secundarios más peligrosos, como las sustancias responsables de la lluvia ácida. Por el contrario, las precipitaciones tienen a su vez un efecto beneficioso al limpiar el ambiente de las partículas contaminantes y minimizando la cantidad de materia particular procedente del tráfico rodado, por ejemplo.

Aquellas localizaciones caracterizadas por una topografía compleja, tales como valles o zonas montañosas, experimentan frecuentemente altas concentraciones de contaminantes en el aire debido a la propia barrera natural que interrumpe la dispersión de la contaminación. Por lo tanto, y a pesar de que las causas que provocan los problemas de contaminación son por lo general bastante complejas, existen casos en los que los propios factores naturales del lugar resultan en una mayor concentración de contaminantes.

El flujo visible de gases contaminantes procedentes de una determinada fuente se conoce como pluma. La altura de la pluma está influenciada por la velocidad y la flotabilidad de los gases emitidos por la fuente. Por su parte, la forma de la pluma se ve afectada por las características de la fuente emisora y de su entorno inmediato. Debido al movimiento continuo del aire alrededor de edificios y otras estructuras, se crean estelas turbulentas que afectan al comportamiento de la pluma. Por otro lado, las condiciones de estabilidad atmosférica en una región específica también producen cambios en el desarrollo de la pluma. Concretamente, la presencia de unas condiciones atmosféricas estables favorecería que la pluma fuera plana, mientras que unas condiciones inestables provocarían que la pluma presentara movimientos cíclicos.



Según Härkönen (2002), los contaminantes liberados por una determinada fuente se mezclan dentro de la CLA, donde los flujos se encuentran bajo la influencia de la superficie terrestre. Debido a las diferentes propiedades de la mezcla, las partes inferior y superior de la CLA se dividen en la capa superficial (alrededor del 10% de la profundidad total) y la capa de mezcla convectiva. En consecuencia, la altura de la fuente de emisión y el movimiento horizontal del aire son factores cruciales en la dispersión de los contaminantes con un aumento débil de la pluma inicial.

En el caso de emisiones procedentes del tráfico, la elevación de la pluma es insignificante ya que la fuente emisora se ubica dentro de los primeros metros a partir de la superficie del suelo. Además, las concentraciones de contaminantes se definen a distancias de menos de diez kilómetros desde la fuente emisora en los modelos de dispersión a escala local, lo que indica que los procesos estudiados se van a producir dentro de la capa superficial.

Las conclusiones de Härkönen establecen también que varios parámetros atmosféricos, tales como la velocidad del viento y la estabilidad, son los factores más importantes que afectan a la dispersión de contaminantes en la capa superficial, dentro del interés de los modelos de dispersión modernos.



## 4. MODELOS DE DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Los modelos de dispersión atmosférica son una simulación matemática sobre cómo los gases se dispersan en la atmósfera. Son especialmente interesantes para el estudio de la dispersión de contaminantes, ya que permiten simular las condiciones reales de transporte y dispersión de los gases como producto de una interacción de las condiciones meteorológicas con las propias fuentes de emisión.

Tal y como se vio en el capítulo anterior, la dispersión de contaminantes depende de varios factores, entre los que están la propia naturaleza física y química de los gases, las condiciones meteorológicas del ambiente, la localización de la fuente emisora o el grado de turbulencia en la atmósfera. Por ello, la información de entrada básica para este tipo de modelos considera la ubicación geográfica de las fuentes emisoras, los factores de emisión de los contaminantes emitidos, la concentración de fondo inicial y factores meteorológicos tales como la turbulencia atmosférica, la velocidad del viento, la temperatura o la presión atmosférica. En resumen, los cálculos necesarios requieren de información básica sobre la fuente del contaminante y las condiciones meteorológicas.

Estos modelos tratan de resolver una ecuación llamada ecuación de advección-difusión, que define la evolución de la concentración de un contaminante en un lugar determinado, dependiendo de los siguientes factores:

- Lugar e intensidad con la que se está emitiendo el contaminante. Esta información se obtiene en casos simples por medidas directas, pero en la mayoría de las ocasiones es necesario utilizar modelos de emisiones.
- El campo de vientos y otras variables meteorológicas. El campo de vientos es el principal responsable del transporte de contaminantes mientras que el resto

de variables informan del estado turbulento de la atmósfera y de qué manera va a afectar a la dispersión de contaminantes.

- La eficacia con la que el contaminante se deposita en la superficie terrestre.
- El modo en el que reacciona con otros compuestos. Los modelos químicos son los que incorporan las ecuaciones químicas representativas de las reacciones implicadas.

Hay que tener en cuenta que los modelos no describen con exactitud el problema de la contaminación de una zona determinada. Estos sólo constituyen una representación aproximada de lo que sucede; por lo tanto, hay que tener presente que la calidad de los resultados depende de los factores que el modelo utiliza como parámetros de entrada, tales como la exactitud del inventario de emisiones, la incertidumbre de los procesos físico químicos que sufren los contaminantes durante su transporte, la calidad y representatividad de los datos meteorológicos, o la validación del modelo en una situación determinada. Es decir, el modelo puede ser adecuado en una situación particular pero no en otra.

## **4.1 Aplicación de los modelos de dispersión atmosférica**

El modelo de dispersión atmosférica es una herramienta muy útil para, en este caso, simular el comportamiento de los gases contaminantes procedentes del tráfico rodado en un área determinada dentro de una carretera. Sin embargo, sus utilidades pueden ser muchas más en el ámbito científico y en la gestión ambiental.

La simulación de la dispersión atmosférica de los gases a través de estos modelos es muy útil para la planificación de campañas experimentales, ya que permiten obtener información previa sobre dónde puede existir mayor concentración. Con respecto a las aplicaciones en el campo de la gestión medioambiental, el Centro



de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT, Web [6]), establece diversas actividades que son detalladas a continuación:

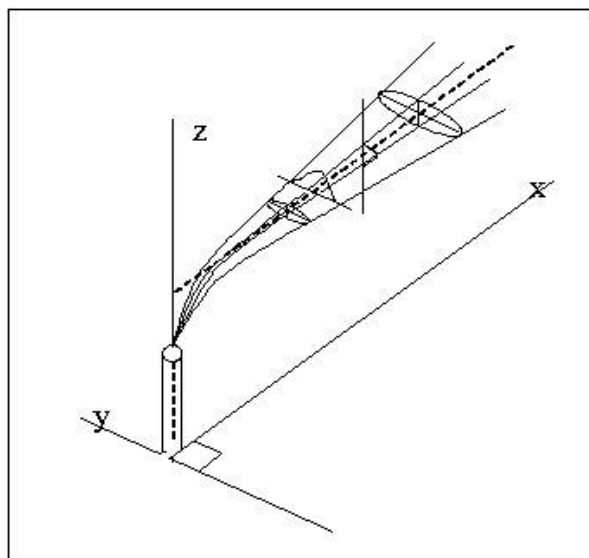
- Estudios sobre la calidad del aire y de impacto ambiental de distintas actividades.
- Determinación de medidas óptimas de reducción de la contaminación atmosférica con la mejor relación coste/beneficio.
- Control y prevención de la contaminación atmosférica y gestión de emergencias.
- Apoyo a la elaboración y verificación del cumplimiento de la legislación y reglamentación para mejorar la calidad del aire.
- Otras aplicaciones, tales como la planificación medioambiental, urbanística, industrial y energética o el diseño de las redes de monitorización de la contaminación.

## 4.2 Clasificación de los modelos de dispersión atmosférica

En primer lugar se puede establecer una clasificación de los modelos de dispersión en dos tipos básicos. Estos son:

- **Modelos físicos:** Se trata de representaciones a pequeña escala de la dispersión atmosférica.
- **Modelos matemáticos:** Son aquellos que se basan en determinados sistemas conceptuales que están soportados en principios físico-químicos e implementados en programas de ordenador. Dentro de los modelos matemáticos se pueden distinguir dos grandes grupos:

- **Modelos Determinísticos:** Están basados en ecuaciones matemáticas que representan los procesos atmosféricos. Los principales modelos dentro de este grupo se detallan a continuación:
  - **Modelos de caja (Box models):** Se trata de un sencillo modelo en el cual la región objeto de estudio es tratada como una caja fija, limitada en su parte inferior por la superficie terrestre y en su parte superior por la altura de la capa de mezcla. Son útiles como primera aproximación a la estimación de la variación temporal de la concentración media en una región.
  - **Modelos Gaussianos:** Están basados en sencillas hipótesis referentes a la naturaleza estocástica de la turbulencia y la dispersión de los gases contaminantes. Por ello, son modelos muy manejables, fáciles de programar y de ejecutar en un ordenador. Estos modelos asumen que la distribución del contaminante dentro de la nube sigue una distribución de Gauss (campana de Gauss), de ahí su nombre. En la figura 4-1 se muestra una sencilla representación gráfica del funcionamiento de un modelo de dispersión tipo Gaussiano.



**Figura 4-1: Fundamentos del modelo Gaussiano**

Fuente: Web [6]

- **Modelos numéricos Eulerianos:** Estos modelos obtienen una solución a partir de procedimientos numéricos aplicados en una malla espacial definida en un sistema de coordenadas determinado. Abarcan un rango mayor de aplicabilidad que los anteriores modelos, siendo especialmente útiles para realizar simulaciones de los contaminantes fotoquímicos (ozono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles).
- **Modelos Lagrangianos:** En este caso los contaminantes están representados por elementos de tamaño diverso como nubes, segmentos o partículas. Dichos elementos son transportados y dispersados por el viento de forma independiente. Existen varios subtipos de modelos, tales como los modelos de pluma segmentada, los modelos de nubes Gaussianas, los modelos PIC (Particle in cell) o los modelos Lagrangianos de caja.
- **Modelos Empíricos:** Están basados en relaciones estadísticas y empíricas entre los datos referentes a la contaminación y otras variables que puedan tener influencia sobre ella. Dentro de este grupo existe un conjunto de modelos llamados "rollback", basados en relaciones sencillas entre los niveles de inmisión y los de emisión. Por otro lado se pueden encontrar los modelos estocásticos, que se basan en técnicas estadísticas aplicadas a datos históricos que expresan las relaciones que existen entre la meteorología y la calidad del aire.

Para la realización de este proyecto se ha utilizado el modelo de dispersión de tipo Gaussiano CALINE4, el cual se analiza detalladamente en el siguiente apartado.



## 4.3 CALINE 4

CALINE4 es un modelo de dispersión atmosférica desarrollado por el Departamento de Transporte de California (Caltrans, Web [7]), que predice el impacto de los contaminantes dentro de un área de estudio a través del cálculo de la concentración de las emisiones procedentes del tráfico rodado. El propósito fundamental del modelo es servir de referencia para advertir de los efectos nocivos de las emisiones contaminantes. CALINE4 es un modelo de dispersión de tipo Gaussiano, de fuente lineal, donde el usuario debe definir la geometría del tramo de carretera en estudio, las condiciones meteorológicas existentes, el volumen de tráfico y la posición de los receptores, fundamentalmente. Asimismo, es necesario definir el factor de emisión para el contaminante en cuestión dentro del tramo de vía específico.

Como se indicaba anteriormente, el modelo está basado en las ecuaciones de difusión Gaussiana y emplea el concepto de la zona de mezcla para caracterizar la dispersión de la contaminación sobre el área de estudio. CALINE4 es capaz de predecir las concentraciones de los gases en estudio en los receptores establecidos en el sistema con una distancia de hasta 500 metros desde la calzada, teniendo en cuenta el conjunto de parámetros de entrada establecidos al arrancar la ejecución del programa.

El modelo está diseñado para ser utilizado por usuarios no necesariamente experimentados, ya que no requiere demasiados datos de entrada y los pasos a seguir son muy intuitivos. Concretamente, los parámetros de entrada que han de ser introducidos por el usuario son el volumen de tráfico, los factores de emisión, la geometría del área de estudio, la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la altura de la zona de mezcla, la clase de estabilidad atmosférica y la posición de los receptores. Del mismo modo, el modelo devuelve los valores de concentración en los puntos definidos de una manera clara y ordenada para poder ser analizados con facilidad por el usuario.



### 4.3.1 Fundamentos del modelo

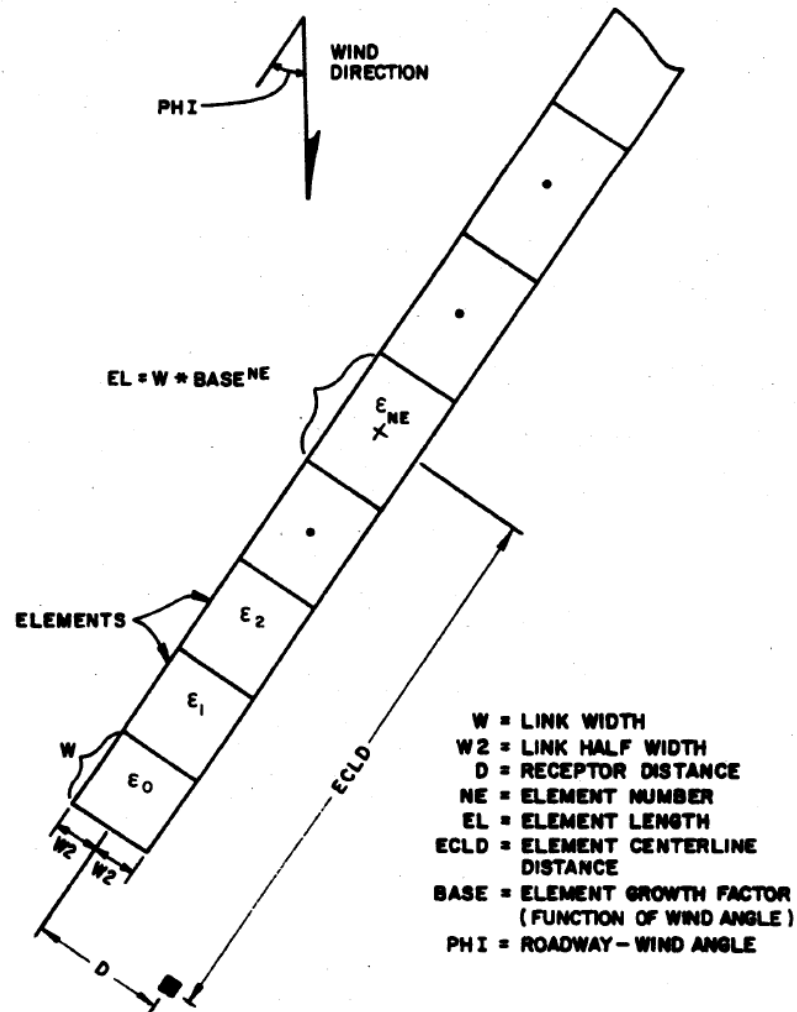
Siguiendo la guía del modelo realizada por el Departamento de Transportes de California (Caltrans, 1989), se van a introducir en este apartado los aspectos básicos relacionados con el proceso de dispersión de contaminantes, así como el proceso general de modelización de CALINE4.

#### ▪ Algoritmo elemento-eslabón

CALINE 4 realiza una división de cada eslabón (llamado link a partir de ahora) del área de estudio en una serie de elementos de concentraciones incrementales, que son calculadas individualmente para luego ser sumadas y formar una estimación de la concentración total para una localización del receptor determinada. En la figura 4-2 se puede ver el esquema utilizado por los autores de la guía para explicar la serie de elementos usados por CALINE4.

Dentro del programa, cada elemento se modela como una fuente lineal finita equivalente (FLS), posicionada perpendicularmente a la dirección del viento y centrada en el punto medio del mencionado elemento.

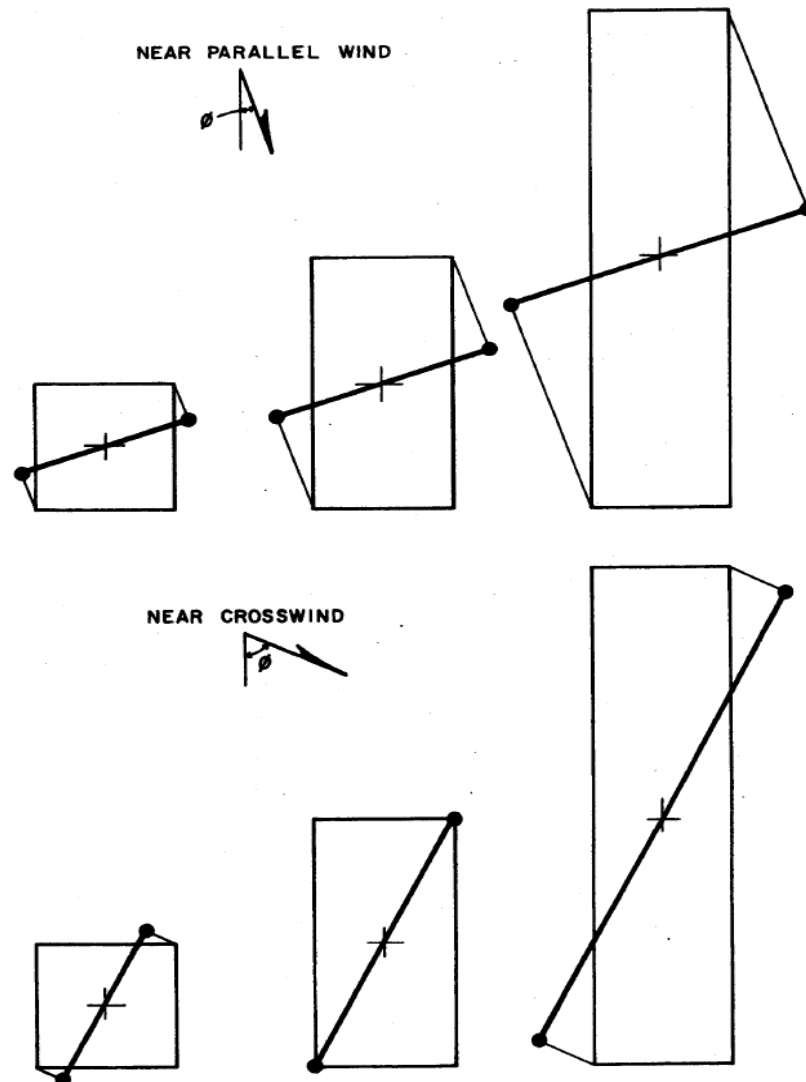
El sistema de coordenadas de referencia se encuentra alineado con la dirección del viento y es definido, para cada elemento, con el origen en su respectivo punto medio. Por lo tanto, las emisiones que se producen dentro de un elemento se dispersan de manera Gaussiana en la dirección hacia la que sopla el viento desde el propio elemento. La longitud y la orientación de la FLS son función del tamaño del elemento y del ángulo viento-calzada, tal y como se muestra en la figura 4-3. Además, con el objetivo de distribuir las emisiones de una manera equitativa, cada elemento se divide en tres subelementos: un subelemento central (ZON2) y dos subelementos periféricos (ZON1 y ZON3). Esto último se refleja en la figura 4-4. La geometría de los sub-elementos, también es función del tamaño del elemento y del ángulo viento-calzada.



**ELEMENT SERIES USED BY CALINE 4**

**Figura 4-2: Series de elementos usados en CALINE4**

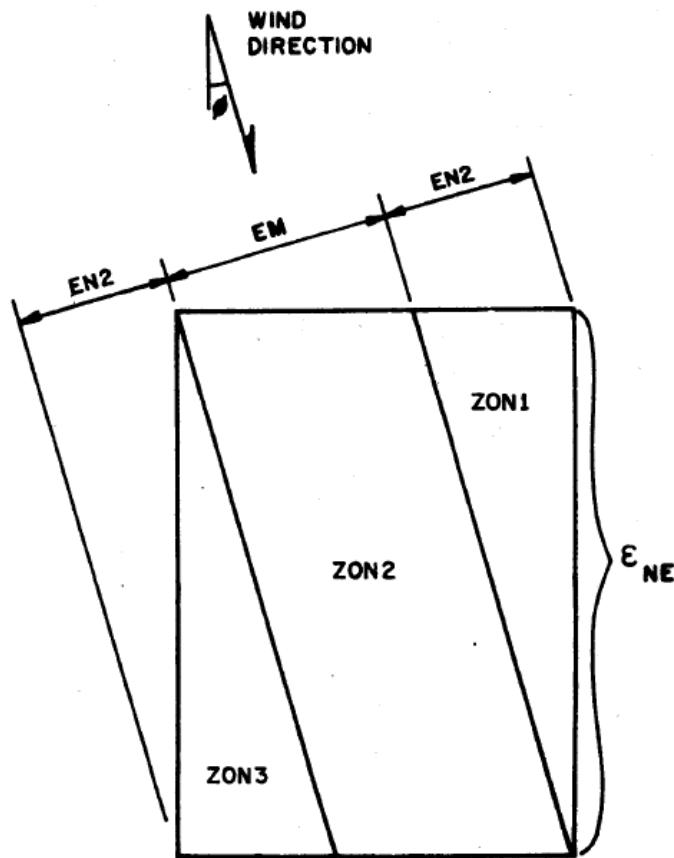
Fuente: Caltrans FHWA/CA/TL-84/15, "CALINE4-A Dispersion Model For Predicting Air Pollution Concentrations Near Roadways", 1989



**EQUIVALENT FINITE LINE SOURCE REPRESENTATION FOR VARIOUS  
ELEMENT SIZES AND WIND ANGLES**

**Figura 4-3: Fuentes lineales finitas equivalentes para diferentes tamaños de  
elemento y ángulos de viento**

Fuente: Caltrans FHWA/CA/TL-84/15, "CALINE4-A Dispersion Model For Predicting  
Air Pollution Concentrations Near Roadways", 1989



**Figura 4-4: Subelementos**

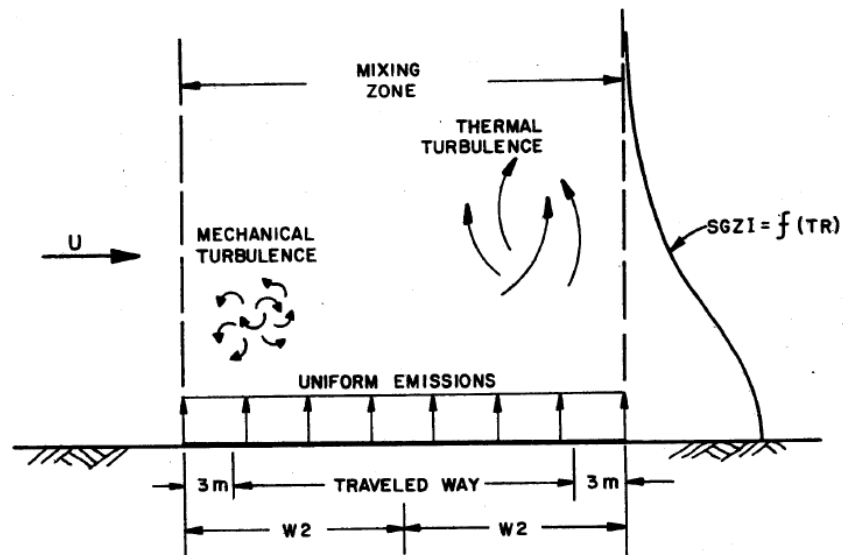
Fuente: Caltrans FHWA/CA/TL-84/15, "CALINE4-A Dispersion Model For Predicting Air Pollution Concentrations Near Roadways", 1989

En definitiva, CALINE4 procesa las concentraciones de cada receptor como una serie de contribuciones incrementales de cada elemento FLS. En la guía desarrollada por Caltrans se pueden consultar con más detalle las pautas seguidas en el desarrollo de los fundamentos del modelo en referencia al algoritmo elemento-eslabón.

#### ▪ **Modelo de la zona de mezcla**

CALINE4 considera la zona por encima de la carretera en cuestión como una zona de emisiones y turbulencias uniforme. Esto es lo que se denomina zona de

mezcla, definida más concretamente como la región por encima del área donde circulan los vehículos más tres metros a ambos lados de la misma, según se muestra en la figura 4-5.



$SGZI$  = INITIAL VERTICAL DISPERSION PARAMETER  
 $TR$  = MIXING ZONE RESIDENCE TIME

Figura 4-5: Zona de mezcla

Fuente: Caltrans FHWA/CA/TL-84/15, "CALINE4-A Dispersion Model For Predicting Air Pollution Concentrations Near Roadways", 1989

#### ▪ Parámetros de dispersión vertical y horizontal

CALINE4 utiliza una versión modificada de las curvas de dispersión vertical de Pasquill-Smith para describir el parámetro de dispersión vertical, en la dirección en la que sopla el viento. Por su parte, el modelo utiliza el método desarrollado por Draxler para generar los valores del parámetro Gaussiano de dispersión horizontal. En la guía utilizada para la elaboración de este apartado se explica con más detalle los métodos en los que CALINE4 se basa para establecer los parámetros de dispersión.

## ▪ Geometría de la carretera

CALINE4 permite la introducción en el modelo de hasta 20 links y 20 receptores dentro de un plano X-Y. Un link es un segmento recto de carretera que tiene un valor constante de anchura, altura, volumen de tráfico y factor de emisión. La localización del link está determinada por las coordenadas de los puntos inicial ( $XL1$ ,  $YL1$ ) y final ( $XL2$ ,  $YL2$ ) de su línea central mientras que la localización de un receptor está determinada por sus coordenadas  $XR$ ,  $YR$  y  $ZR$ . Por lo tanto, CALINE4 puede ser usado para modelar múltiples fuentes y receptores en diferentes áreas de carretera variando el factor de emisión correspondiente. El programa se encarga de sumar automáticamente la contribución de cada link a cada receptor. En la figura 4-6 se puede observar la geometría del link según se ha definido anteriormente.

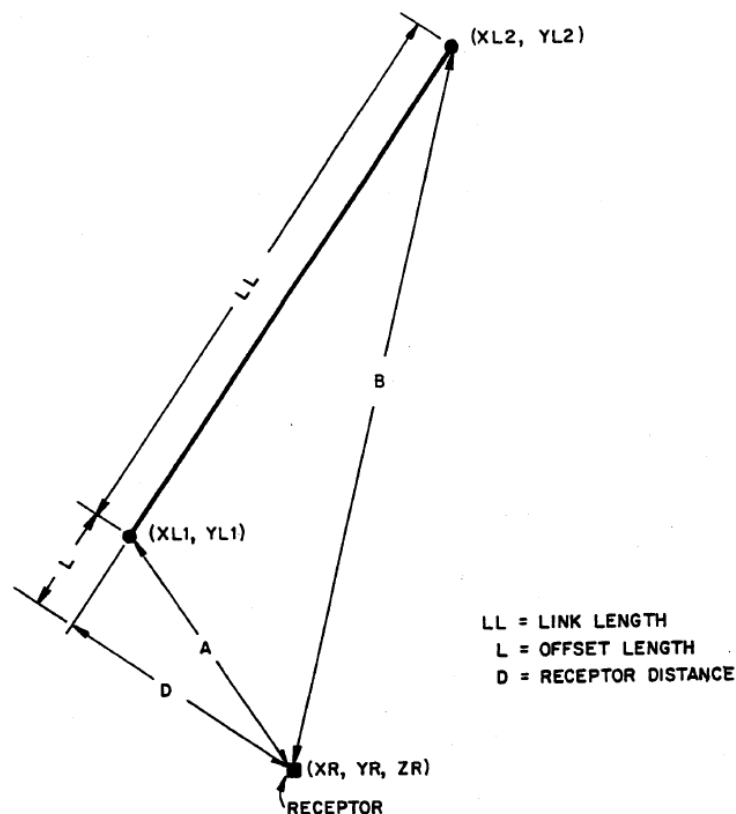


Figura 4-6: Geometría del link

Fuente: Caltrans FHWA/CA/TL-84/15, "CALINE4-A Dispersion Model For Predicting Air Pollution Concentrations Near Roadways", 1989



#### ▪ **Efectos topográficos**

La formulación Gaussiana utilizada en CALINE4 está basada en dos suposiciones: flujo de viento horizontalmente homogéneo y condiciones meteorológicas en estado estacionario. El problema surge en lugares con una topografía compleja que podría poner esas suposiciones válidas en duda. Por ejemplo, el viento podría ser redireccionado por diferentes elementos topográficos del lugar de estudio, modificando el funcionamiento correcto de la modelización. Por este motivo, el uso de CALINE4 en terrenos complejos debería ser utilizado con especial cuidado.

#### ▪ **Velocidad de deposición y velocidad de sedimentación**

La velocidad de deposición es una medida de la tasa de velocidad a la cual un contaminante puede ser absorbido por la superficie. Esto implica un proceso de difusión molecular, no turbulento, a través de la cubierta laminar de la superficie. Por su parte, la velocidad de sedimentación es la tasa de velocidad a la cual una partícula cae respecto a su entorno cercano.

### **4.3.2 Introducción a la ejecución de CALINE4**

En este apartado se pretende establecer una simple introducción a la utilización de CL4, el software desarrollado para poner en práctica el modelo de dispersión CALINE4. Para ello, se utiliza la guía desarrollada por Caltrans (1998). La mencionada guía define CL4 como una interfaz gráfica basada en Windows, diseñada para facilitar la entrada de datos y la ejecución del modelo de dispersión CALINE4. En la figura 4-7 se muestra la pantalla principal de CL4.

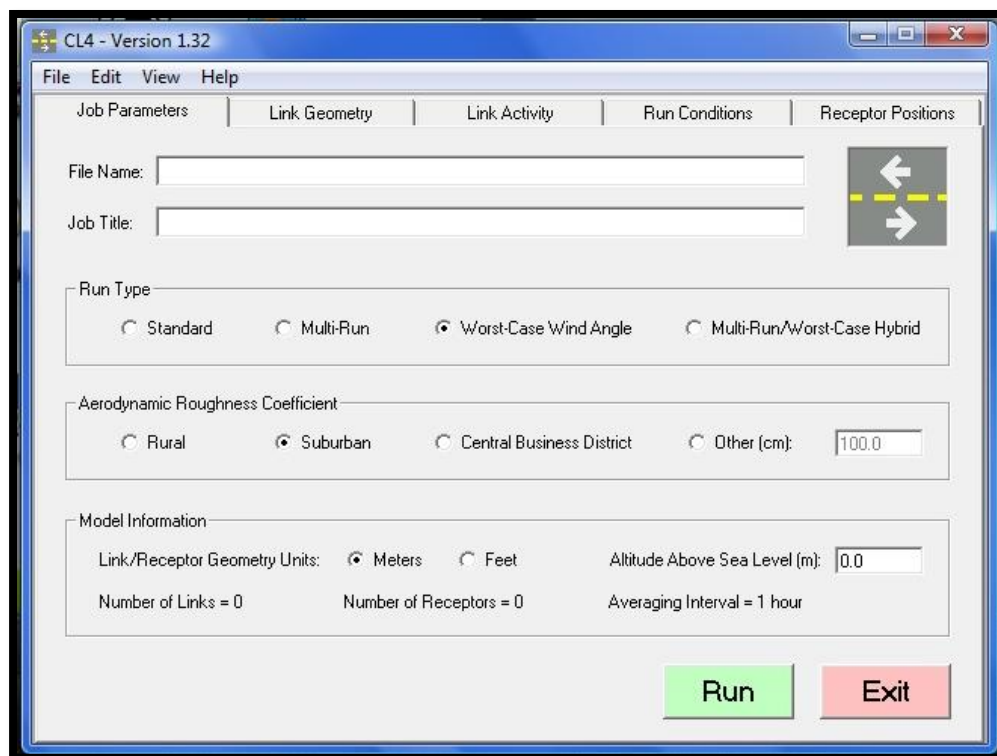


Figura 4-7: Vista principal de CL4

#### 4.3.2.1 Creación del archivo de trabajo

Para comenzar la ejecución del programa se debe crear un nuevo archivo de trabajo y guardarlo, dándole el nombre deseado en ese momento. La extensión de archivo estándar para los trabajos en CALINE4 es .dat, la cual es asignada por CL4 de forma automática.

#### 4.3.2.2 Introducción de los datos de entrada

Para poder completar una ejecución en CALINE4 es necesario introducir los parámetros de entrada al modelo. Este proceso se realiza de una manera muy intuitiva en CL4 ya que los datos se introducen en cinco pantallas distintas (ver figura 4-7), las cuales se nombran a continuación:





- Job Parameters
- Link Geometry
- Link Activity
- Run Conditions
- Receptor Conditions

En las siguientes secciones se detallan cada una de las cinco pantallas de entrada de datos nombradas arriba. Se trata de proporcionar las definiciones necesarias junto con las orientaciones y consejos que la guía del programa ofrece para ayudar a los usuarios a completar el proceso de entrada de datos.

#### ▪ Pantalla JOB PARAMETERS

La pantalla referente a los parámetros de trabajo contiene información general que identifica el trabajo, define los parámetros generales del modelo y establece las unidades (pies o metros) que se utilizarán en los datos de entrada correspondientes a la geometría del link y a la posición de los receptores. A continuación se definen brevemente cada uno de los campos a rellenar en esta primera pantalla de entrada de datos.

**File name:** Muestra el nombre del archivo sobre el cual se está trabajando.

**Job Title:** Se trata de un campo opcional para describir el contenido del trabajo.

**Run type:** Existen diferentes opciones de ejecución del modelo que determinan los tiempos promedio (para las concentraciones de CO) y la manera en la que el ángulo horario de dirección del viento se determinará (el ángulo del viento se refiere al ángulo entre la dirección de la carretera y la dirección del viento). Los tipos de ejecución elegibles son los siguientes:

- Standard: Calcula la concentración media horaria de CO en los receptores. El usuario debe introducir previamente una dirección del viento.



- Multi-Run: Calcula la concentración media de CO captada por los receptores durante ocho horas. El usuario debe introducir en este caso los ángulos de viento para cada una de las horas.
- Worst-case wind angle: Calcula la concentración media horaria de CO en los receptores. A diferencia del primer caso, el modelo selecciona los ángulos de viento que producen los valores más altos de concentración de CO en cada uno de los receptores. Esta suele ser la opción más adecuada para la mayoría de los usuarios, aunque no en este caso, ya que lo que se busca aquí es el escenario que más se ajuste a la realidad.
- Multi-Run/Worst-Case hybrid: Calcula la concentración media de CO captada por los receptores durante ocho horas. Al igual que en el caso anterior, el modelo selecciona los ángulos de viento que producen los valores más altos de concentración de CO en cada uno de los receptores.

**Aerodynamic Roughness Coefficient:** Este parámetro determina la cantidad de turbulencia atmosférica local que afecta a la pluma de dispersión de los gases. CL4 ofrece las siguientes cuatro opciones para el coeficiente de rugosidad aerodinámica:

- Rural: Coeficiente de rugosidad = 10 cm
- Suburban: Coeficiente de rugosidad = 100 cm
- Central Business District: Coeficiente de rugosidad = 400 cm
- Otros: Consultar la guía del programa para seleccionar un valor adecuado.

**Model Information:** Proporciona información que asegura la calidad de los resultados que se obtendrán tras la ejecución del programa. Los datos a introducir por parte del usuario se exponen a continuación.

- Link / Receptor geometry units: Seleccionar la unidad (metros o pies) que se utilizará para definir la geometría de los links de la carretera y la posición de



los receptores. Los factores meteorológicos siempre se introducirán en unidades métricas. Por su parte, los factores de emisión se definen siempre en términos de gramos por milla.

- Altitude above sea level: Define la altura sobre el nivel del mar. Este dato se utiliza para determinar la velocidad de propagación de la pluma. No afecta a la geometría de los links o a la posición de los receptores.
- Number of Links: La suma total de links que el usuario ha definido en el apartado de geometría de los links para la carretera objeto de estudio.
- Number of Receptors: La suma total de los receptores que el usuario ha definido en la sección correspondiente a la posición de los receptores.
- Averaging Interval: Indica si el usuario ha optado por calcular promedios de una u ocho horas para las concentraciones de CO en los receptores.

#### ▪ **Pantalla LINK GEOMETRY**

En este apartado se trata de completar la matriz que aparece en la figura 4-8 para definir la red de carreteras objeto de estudio. Cada fila de la matriz define un único link. El programa permite introducir hasta 20 links que se definen como segmentos de línea recta. A modo de consejo, la guía del programa establece que la distancia entre la línea central de la carretera y la línea que representa el link no debe ser mayor de 3 metros. Cada uno de los campos pertenecientes a esta página de entrada de datos se detallan a continuación.

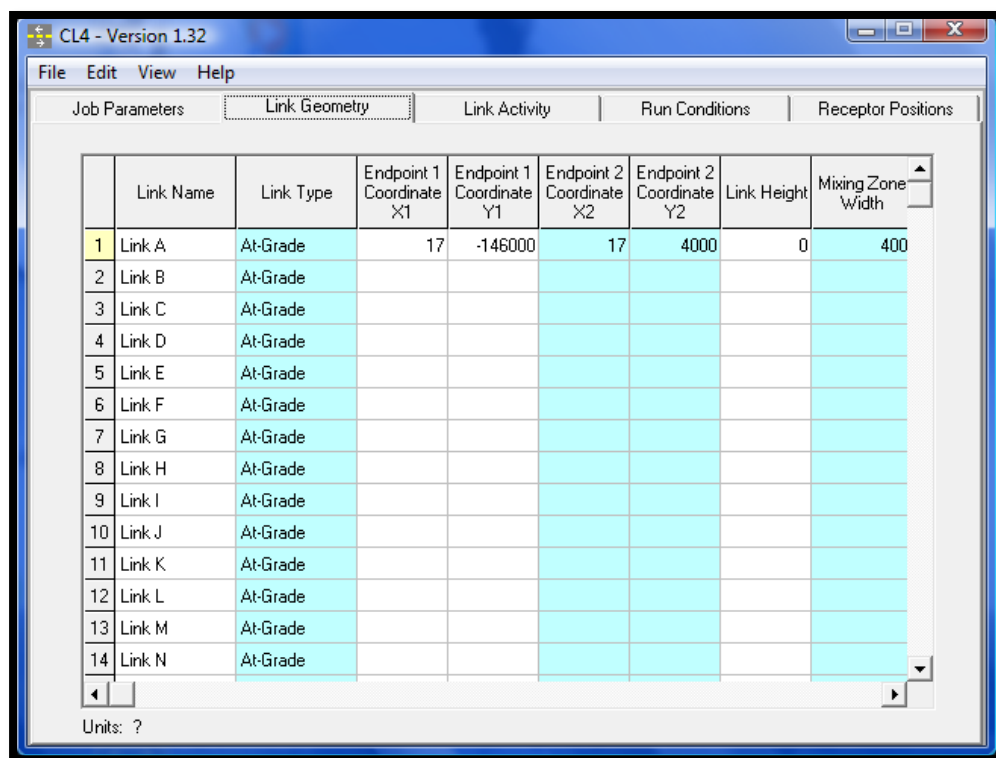


Figura 4-8: Pantalla Link Geometry de CL4

**Link Name:** Se trata de un campo opcional en el que el usuario puede definir una descripción para el link.

**Link Type:** El usuario debe seleccionar una de las siguientes cinco opciones para definir el tipo de vía que cada link representa:

- At-Grade: En este caso, CALINE4 no permite que la pluma se mezcle por debajo del nivel del suelo, que se supone que es cero.
- Fill: CALINE4 coloca automáticamente la altura del link a cero y asume que el flujo de aire sigue la superficie del terreno, sin ser alterado.
- Depressed: En estos casos CALINE4 aumenta el tiempo de residencia de una región de aire en la zona de mezcla. El tiempo de residencia aumenta

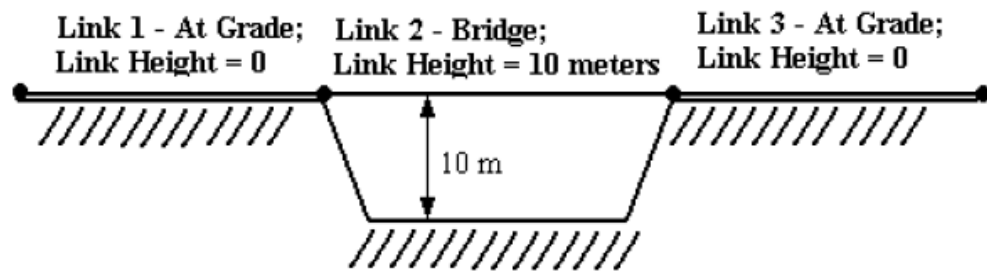


proporcionalmente con la profundidad de la depresión en la carretera. Por su parte, la zona de mezcla se define como el ancho del conjunto de carriles, más 3 metros en cada lado.

- Bridge: Para secciones de puentes, CALINE4 permite que el aire se mueva por encima y por debajo del link establecido.
- Parking Lot: Los links definidos en zonas de estacionamiento deben establecerse de modo que coincidan con las correspondientes vías de acceso.

**Endpoint Coordinates:** Como ya se mencionó anteriormente, los links son definidos como segmentos de línea recta. En consecuencia, las coordenadas de punto final, (XL1, YL1) y (XL2, YL2), definen las posiciones de los extremos del link. El usuario debe definir la geometría del link y la posición de los receptores con un sistema de coordenadas consistente. Para ello, la posición del origen del sistema es arbitraria pero siempre ha de cumplirse que el eje Y esté orientado de norte a sur, con valores crecientes en sentido norte. Por su parte, el eje X debe estar orientado de este a oeste, con valores crecientes en sentido este. Cuando llegue el momento, el usuario deberá definir la dirección del viento según las condiciones establecidas anteriormente en referencia al sistema de coordenadas.

**Link Height:** Para todos los tipos de links, excepto puentes, la altura representa el nivel de altitud del link con respecto al terreno de la zona correspondiente. El nivel del suelo se define a 0 metros. En la figura 4-9 se puede ver un ejemplo de la definición de la altura en diferentes tipos de link.



**Figura 4-9: Altura para diferentes tipos de link**

Fuente: D.L. Coe et al, "User's Guide for CL4: A user-friendly interface for the CALINE4 Model for transportation project impact assessments"

**Mixing Zone Width:** Tal y como se he explicado previamente, la zona de mezcla se define como el ancho de la calzada, más 3 metros a cada uno de los lados de la misma. El valor mínimo permitido es de 10 metros.

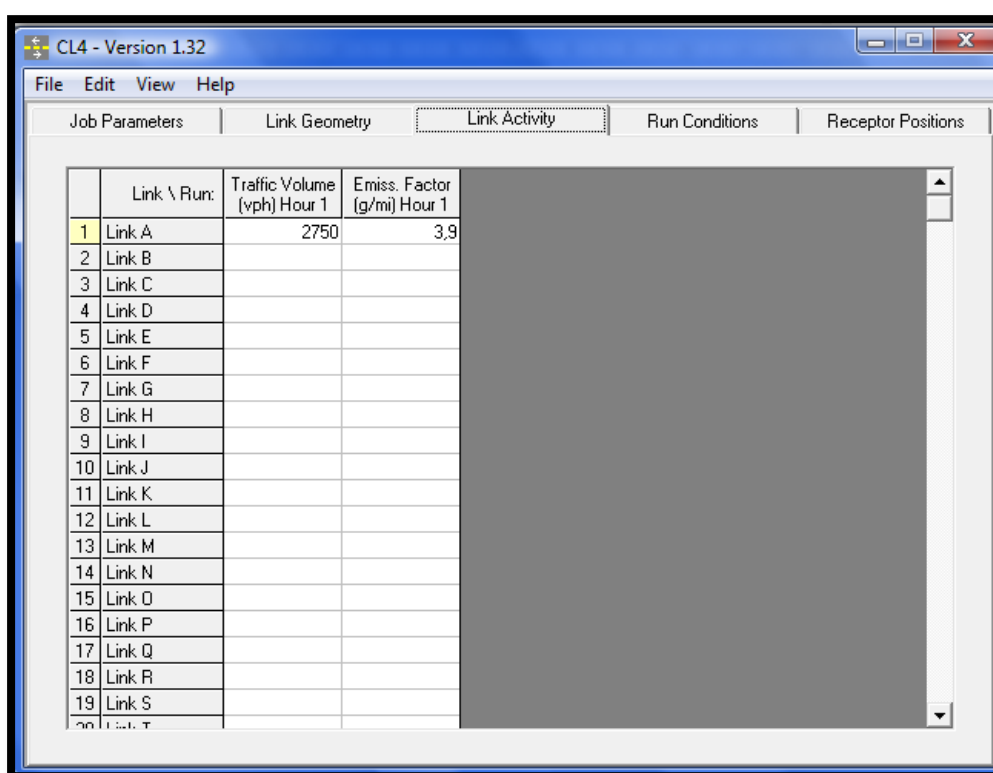
**Canyon/Bluff Mix:** Un estudio en una zona con topografía compleja puede invalidar alguno de los supuestos en los que se basa CALINE4 y que ya fueron definidos con anterioridad. Por lo tanto, terrenos caracterizados por una topografía atípica deben ser estudiados con cautela.

#### ▪ Pantalla LINK ACTIVITY

Esta pantalla incluye la información necesaria para definir la actividad existente dentro del link. Para ello, el usuario tiene que definir el nivel de tráfico y el factor de emisión para cada link. En la figura 4-10 se ilustra un ejemplo de introducción de datos en la pantalla "link activity", en la que además se pueden ver cada uno de los siguientes campos pertenecientes a ella:

**Traffic Volume:** En este apartado se introduce el dato de volumen de tráfico por hora previsto para cada link, en unidades de vehículos por hora. Si la ejecución se realiza para ocho horas, es necesario definir un volumen de tráfico para cada una de ellas.

**Emission Factor:** Se trata de la tasa promedio de emisiones de la flota de vehículos que circulan por el link establecido, expresado en términos de gramos por milla y por vehículo. Para la realización de las ejecuciones en este proyecto, los factores de emisión son calculados mediante el programa EMFAC2007, el cual será introducido en apartados posteriores. Debido a que el factor de emisión varía según la hora del día, es preciso definirlo para cada una de las ocho horas en el caso de realizar una ejecución múltiple del modelo.



	Link \ Run:	Traffic Volume (vph) Hour 1	Emiss. Factor (g/mi) Hour 1
1	Link A	2750	3.9
2	Link B		
3	Link C		
4	Link D		
5	Link E		
6	Link F		
7	Link G		
8	Link H		
9	Link I		
10	Link J		
11	Link K		
12	Link L		
13	Link M		
14	Link N		
15	Link O		
16	Link P		
17	Link Q		
18	Link R		
19	Link S		

Figura 4-10: Pantalla Link Activity de CL4

#### ▪ Pantalla RUN CONDITIONS

Esta pantalla recoge los parámetros meteorológicos necesarios para ejecutar el modelo CALINE4. En el caso concreto que se trata en este proyecto, se deben emplear las condiciones meteorológicas previstas en el escenario real en el que se van a realizar las medidas. A continuación se detallan cada uno de los campos a rellenar por el usuario en esta pantalla.



**Wind Speed:** Se trata de la velocidad del viento expresada en metros por segundo.

**Wind Direction:** En este campo el usuario introduce el valor de la dirección en la que sopla el viento, medida en grados. Según el sistema de coordenadas establecido anteriormente, se parte de un valor de 0° en el sentido norte y el ángulo incrementa en sentido horario desde ese punto (es decir: 0°=Norte, 90°=Este, 180°=Sur, 270°=Oeste).

**Wind Direction Standard Deviation:** El usuario debe introducir aquí el valor de la desviación estándar de la dirección del viento, la cual se puede calcular mediante un algoritmo establecido por Yamartino (1984).

**Atmospheric Stability Class:** Es simplemente una medida de la turbulencia atmosférica en la zona de estudio, medida según el criterio de Turner. En la tabla 4-1 se muestra la clase de estabilidad atmosférica utilizada para los diferentes valores de velocidad, que se establece siguiendo el criterio de Pasquill. Se expone además una correspondencia entre los criterios de Pasquill y Turner en la tabla 4-2.

Wind Velocity (V) on referene height of 10 m (m/s)	Daytime period - Insolation			Nighttime period -Cloudiness	
	Strong	Moderate	Slight	Thinly overcast	<= 3/8 cloud
$V \leq 2$	A	A - B	B	-	-
$2 < V \leq 3$	A - B	B - C	C	E	F
$3 < V \leq 5$	B	B - C	C	D	E
$5 < V \leq 6$	C	C - D	D	D	D
$6 < V$	C	D	D	D	D

**Tabla 4-1: Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [8]





Pasquill	Turner
A	1
B	2
C	3
D	4
E	6
F	7

**Tabla 4-2: Correspondencia entre las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill y Turner**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [8]

**Mixing Height:** Establece la altura a la que la turbulencia térmica se produce debido al calentamiento de la tierra provocado por los rayos solares. Valores razonables para este parámetro suponiendo el peor escenario posible en la zona de estudio no suelen tener un impacto significativo en los resultados del modelo.

**Ambient Temperature:** El usuario debe introducir un valor para la temperatura ambiente dentro de la zona de estudio. La temperatura ambiente afecta significativamente a las emisiones de CO procedentes de los vehículos, por lo que se ha de analizar detalladamente las condiciones ambientales del lugar objeto de estudio.

**Ambient Pollutant Concentration:** Este parámetro refleja la concentración de contaminantes de fondo existente en la zona de estudio, expresada en partes por millón.

Una ilustración de lo anteriormente explicado se encuentra en la figura 4-11, en la cual se muestra un ejemplo de introducción de datos correspondientes a la pantalla de condiciones de ejecución.

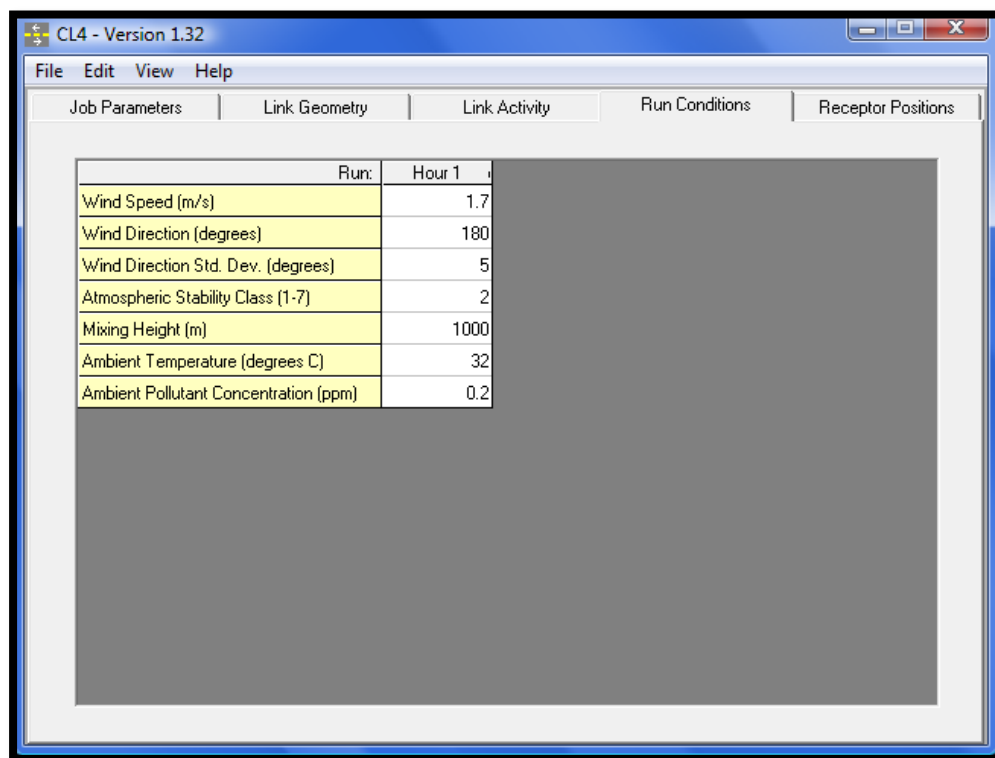


Figura 4-11: Pantalla Run Conditions de CL4

#### ▪ Pantalla RECEPTOR POSITIONS

La pantalla referente a la posición de los receptores contiene los datos de entrada para todas las posiciones de los diferentes receptores establecidos en la ejecución y distribuidos a lo largo del área de estudio. También se muestra un diagrama de la geometría de los links y la posición de los receptores. La posición de los receptores debe ser definida con el mismo sistema de coordenadas cartesianas y las mismas unidades de medida que se utilizaron para definir la geometría de los links.

Se pueden introducir hasta 20 receptores distintos, debiendo el usuario definir su posición mediante las correspondientes coordenadas X e Y además de su altura (coordenada Z). En la figura 4-12 se muestra un ejemplo de definición de la posición de los receptores en CL4.

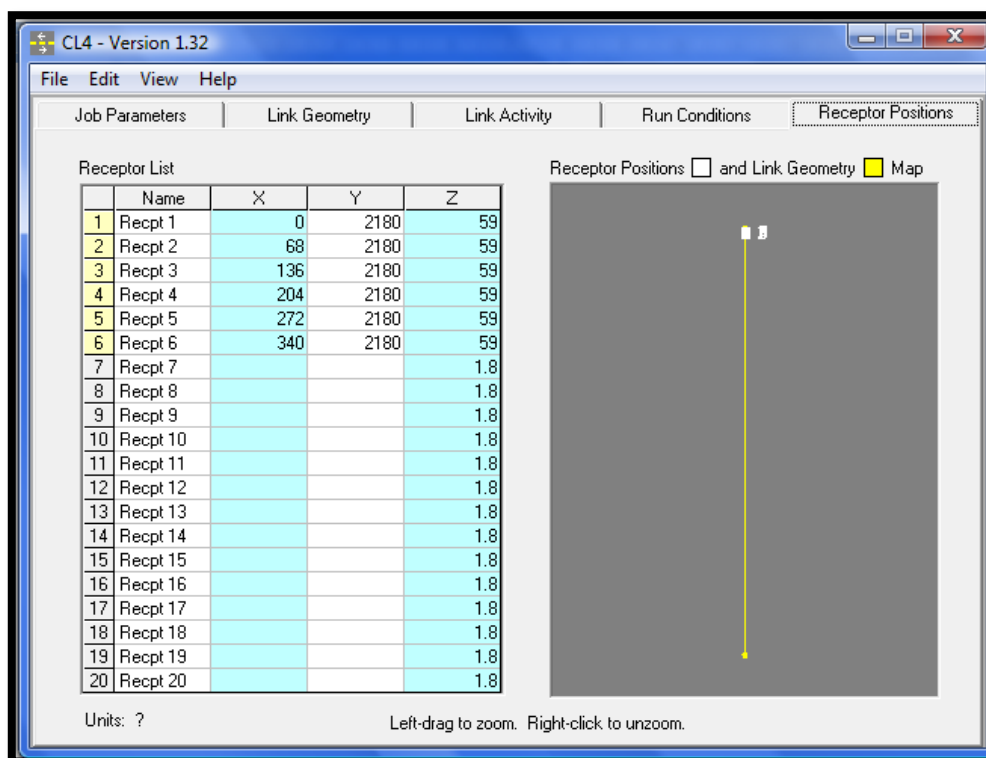


Figura 4-12: Pantalla Receptor Positions de CL4

#### 4.3.2.3 Ejecución y resultados

El usuario puede ejecutar CALINE4 pulsando el botón verde "Run" ubicado en la primera pantalla de entrada de datos que es, a su vez, la pantalla principal de CL4. En el caso de que faltase algún dato o la introducción de los mismos se hubiera hecho de manera incorrecta, el programa se encarga de notificarlo al usuario.

El archivo de salida de CALINE4 proporciona los resultados en cuatro secciones diferentes, llamadas: Header, (I) Site Variables, (II) Link Variables y (III) Receptor Location and Model Results. Un ejemplo de fichero de resultados se ilustra en la figura 4-13, en la cual se pueden observar cada una de las secciones definidas previamente.



CALINE4: CALIFORNIA LINE SOURCE DISPERSION MODEL  
JUNE 1989 VERSION  
PAGE 1

JOB: Example Two: Rural Curved Alignment  
RUN: (MULTI-RUN)  
POLLUTANT: Carbon Monoxide

I. SITE VARIABLES

VD= .0 CM/S                      Z0= 50. CM                      ALT= 0. (M)  
VS= .0 CM/S

II. METEOROLOGICAL CONDITIONS

RUN	* U * (M/S)	BRG (DEG)	CLASS	AMB (PPM)	MIXH (M)	SIGTH (DEG)	TEMP (C)
1. Hour 1	* .5	50.	7 (G)	3.0	1000.	25.00	5.0
2. Hour 2	* .5	45.	6 (F)	3.0	1000.	25.00	5.0
3. Hour 3	* 1.0	45.	6 (F)	3.0	1000.	15.00	12.5
4. Hour 4	* 1.5	30.	5 (E)	3.0	1000.	15.00	12.5
5. Hour 5	* 2.5	30.	4 (D)	3.0	1000.	15.00	12.5
6. Hour 6	* 2.5	30.	4 (D)	3.0	1000.	30.00	20.0
7. Hour 7	* 2.5	90.	4 (D)	3.0	1000.	30.00	20.0
8. Hour 8	* 2.5	90.	4 (D)	3.0	1000.	10.00	20.0

III. LINK GEOMETRY

LINK DESCRIPTION	* LINK COORDINATES (M) * X1 Y1 X2 Y2	* H * TYPE (M)	W (M)
A. Parking Lot	* -707 -707 0 0	* AG	.0 28.0
B. B	* 0 0 120 175	* DP	.0 28.0
C. C	* 120 175 150 350	* FL	.0 28.0
D. D	* 150 350 150 1350	* BG	.0 28.0
E. E	* 150 1350 175 1510	* PK	.0 28.0
F. F	* 175 1510 265 1640	* AG	.0 28.0
G. G	* 265 1640 350 1760	* AG	.0 28.0
H. H	* 350 1760 475 1830	* AG	.0 28.0
I. I	* 475 1830 650 1850	* AG	.0 28.0
J. J	* 650 1850 1650 1850	* AG	.0 28.0

Figura 4-13: Archivo de resultados de CL4



### 4.3.3 Cálculo del factor de emisión. EMFAC2007

La Junta de Recursos del Aire de California (ARB, Web [9]) desarrolló un modelo para calcular los factores de emisión procedentes de todo tipo de vehículos motorizados, desde turismos hasta camiones de carga pesada, operando por los distintos tipos de carreteras dentro del estado de California, en Estados Unidos. EMFAC2007 es la última versión del modelo, aplicando los más recientes conocimientos de ARB sobre cómo circulan los vehículos y cuánto contaminan.

En este proyecto se ha utilizado el software de EMFAC2007 para la obtención de los factores de emisión que son necesarios como parámetro de entrada en el modelo de dispersión para obtener las concentraciones de gases contaminantes.

El modelo calcula los factores de emisión y los correspondientes inventarios de emisiones para contaminantes tales como los hidrocarburos, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), partículas en suspensión, óxidos de azufre (SOx) o plomo (Pb).

EMFAC2007 tiene en cuenta a la hora de calcular los factores de emisión los diferentes procesos de emisión de gases posibles que pueden suceder en el vehículo. Esto es debido a que la magnitud de estas emisiones varía dependiendo de la situación en la que se encuentra el vehículo en cada momento. La guía de uso del modelo (ARB, 2007) establece diferentes tipos de proceso de emisión de contaminantes posibles, que son detallados a continuación.

**Running Exhaust:** Contempla aquellas emisiones contaminantes que salen del tubo de escape del vehículo mientras éste circula por la calzada.

**Idle Exhaust.** En este caso se consideran las emisiones que salen del tubo de escape del vehículo mientras está en funcionamiento, pero sin recorrer una distancia significativa. Este caso se refiere exclusivamente a las operaciones de carga y descarga de mercancías de los vehículos de carga pesados.



**Starting Exhaust:** Emisiones de escape que se producen como resultado de arrancar un vehículo. La magnitud de estas emisiones depende del tiempo que el vehículo haya estado en reposo antes de arrancar.

**Diurnal:** Emisiones que se producen cuando el aumento de la temperatura ambiente causa la evaporación del combustible de los vehículos estacionados a lo largo del día. Estas pérdidas se producen fundamentalmente por fugas en el sistema de combustible. Si un vehículo está estacionado durante un determinado período de tiempo, las emisiones producidas en los primeros 35 minutos son considerados como de parada en caliente mientras que las restantes emisiones se cuentan como diurnas, siempre y cuando la temperatura ambiente se incremente durante el resto del período de tiempo.

**Resting Loss:** Estas pérdidas se producen mientras el vehículo está estacionado y son causadas por la infiltración de combustible a través del caucho y del plástico. Las emisiones se contabilizan dentro de este proceso si el vehículo no ha sido utilizado durante 35 minutos y la temperatura ambiente es constante o está decreciendo.

**Hot Soak:** En este caso se consideran las emisiones de evaporación producidas inmediatamente después de finalizar un viaje debido al calor remanente del combustible y al hecho de que el motor permanece caliente durante un corto período de tiempo después de ser apagado.

**Running Losses:** Son emisiones que se produce cuando los vapores calientes escapan del sistema de combustible o no son filtrados adecuadamente mientras el vehículo está en funcionamiento.

**Tire Wear:** Se tienen en cuenta aquellas emisiones de partículas procedentes de los neumáticos como consecuencia del desgaste.

**Brake wear:** Son emisiones de partículas procedentes del uso del freno.

### 4.3.3.1 Introducción a la ejecución de EMFAC2007

En este apartado se van a describir brevemente cada uno de los pasos necesarios para la ejecución de EMFAC2007. Para ello, se explica el contenido de cada una de las pantallas principales del programa, en las que el usuario debe introducir los parámetros de entrada para finalmente obtener los factores de emisión buscados. Antes de hacer esto, es importante mencionar que el usuario tiene la posibilidad de crear un nuevo archivo o de modificar uno ya existente. Además, es posible definir diferentes escenarios de estudio en un mismo archivo, de modo que se puedan realizar análisis más detallados dentro de un mismo estudio.

#### ▪ Pantalla Principal

En esta ventana del programa se muestra el nombre del archivo, una lista con los escenarios definidos y diferentes opciones para manipular los archivos y los escenarios. Este paso es el punto de partida para la entrada de los diferentes escenarios en un archivo. En la figura 4-14 se muestra una vista de esta primera pantalla de EMFAC2007.

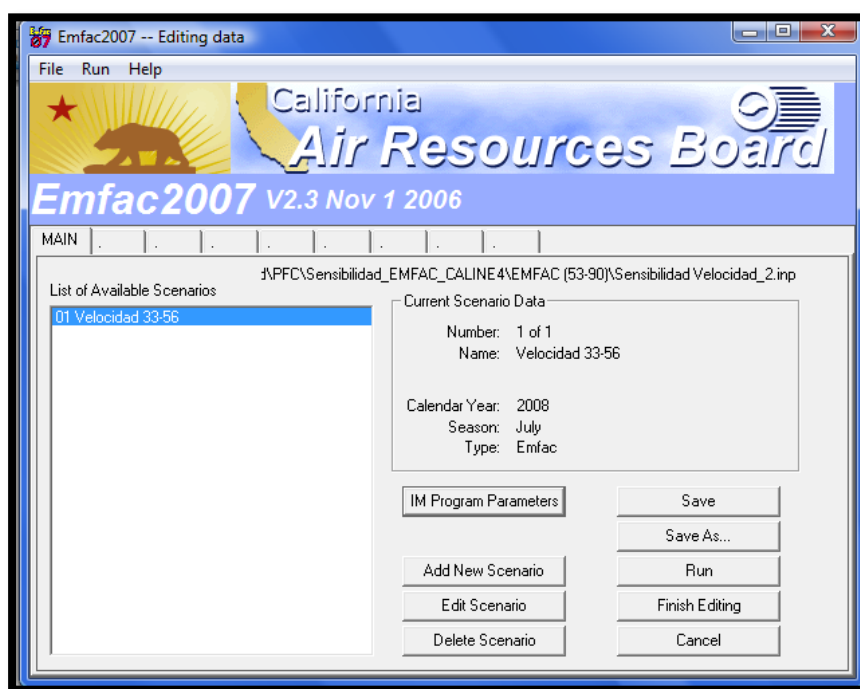


Figura 4-14: Vista general de EMFAC2007



## ▪ Primera pantalla de introducción de datos

En esta primera pantalla el usuario define ciertos parámetros básicos para el nuevo escenario creado en el archivo de trabajo (ver figura 4-15). Concretamente EMFAC2007 requiere la introducción de los siguientes parámetros:

**Geographic Area:** En este campo el usuario debe definir el tipo de área en la que se va a realizar el estudio. El modelo ofrece cuatro tipos diferentes: estado, cuenca atmosférica, distrito o región. Dentro de estos tipos el usuario debe seleccionar el área correspondiente entre las 69 opciones que EMFAC2007 contiene y que están distribuidas a lo largo de la geografía del Estado de California, en Estados Unidos.

**Calendar Years:** En este campo se deben definir los años para los cuales se va a suponer el estudio. En EMFAC2007, a diferencia de las anteriores versiones, se pueden definir varios años en un mismo escenario, por lo que se puede calificar como un modelo de escenario múltiple.

**Season or Month:** Por último, en esta ventana es necesario especificar el mes o estación del año para la cual se va a ejecutar el estudio. El modelo incluye datos de temperatura, humedad relativa y otros parámetros para cada zona geográfica, año, mes y estación.





Figura 4-15: Primera pantalla de introducción de datos de EMFAC2007

#### ▪ Segunda pantalla de introducción de datos

Los parámetros solicitados por EMFAC2007 en esta nueva pantalla se describen brevemente a continuación. En la figura 4-16 se muestra una vista de esta pantalla.

**Scenario Title:** El usuario debe definir un nombre para el nuevo escenario creado, o bien dejar que el programa defina uno por defecto.

**Model Years:** Aquí se debe introducir el rango de años para el cual el usuario prevé tener vehículos dentro del área de estudio. Es decir, se trata de establecer la edad máxima de los vehículos que circulan por el área definida.

**Vehicle Classes:** Por defecto el modelo establecerá todos los tipos de vehículos posibles en el escenario creado. Sin embargo, el usuario tiene la posibilidad de

discriminar entre los distintos tipos para definir únicamente aquellos vehículos que circulan por el área de estudio.

**I/M Program Schedule:** En este caso la guía del modelo recomienda mantener esta opción por defecto, sin variación.



Figura 4-16: Segunda pantalla de introducción de datos de EMFAC2007

#### ▪ Pantalla de modelización

En esta última pantalla de EMFAC2007<sup>1</sup> (ver figura 4-17) el usuario tiene que definir el modo de ejecución del modelo, el cual permite el cálculo de factores de emisión para los siguientes modos:

**Modo Burden:** Se calcula el total de emisiones en toneladas/día.

<sup>1</sup> Se trata de la última pantalla necesaria para poder realizar una ejecución del programa. En realidad, EMFAC2007 incluye más pantallas que permiten al usuario definir los datos que por defecto vienen establecidos en el modelo, para así adecuarse mejor a las condiciones del estudio.



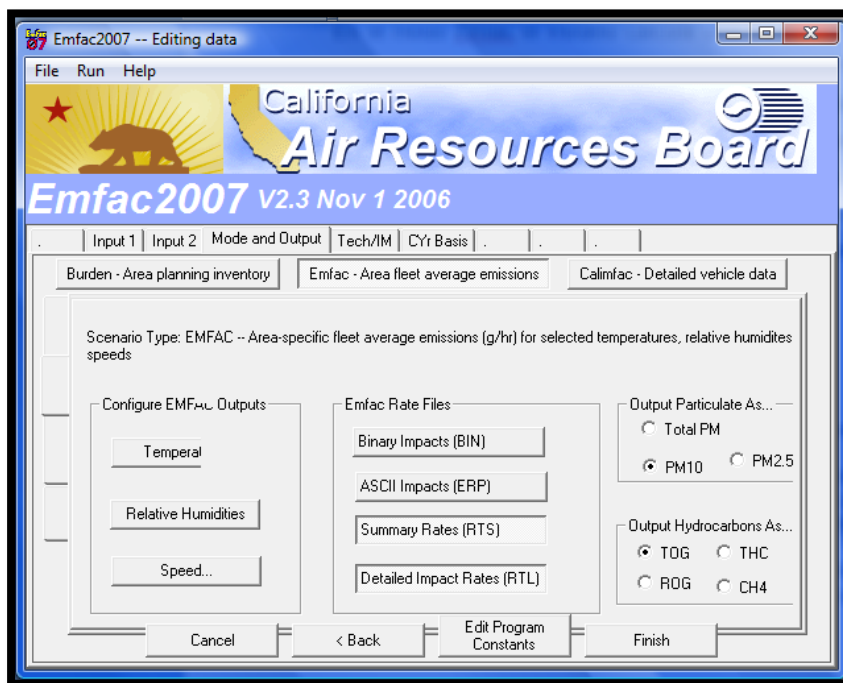
**Modo Emfac:** En este caso se calculan los factores de emisión en términos de gramos de contaminante emitidos por actividad del vehículo.

**Modo Calimfac:** En este último modo se calculan los factores de emisión de manera muy detallada, para cada tipo de vehículo y año.

Dentro del marco de este proyecto, se ha utilizado EMFAC2007 para la obtención del factor de emisión para su posterior utilización en el modelo de dispersión atmosférica CALINE4. Por ello, a continuación sólo se detalla el funcionamiento del modo Emfac, pudiéndose consultar los otros modos en la guía del modelo.

El modo Emfac, tal y como se definió anteriormente, genera los factores de emisión en términos de gramos de contaminante emitidos por actividad del vehículo, la cual puede darse en términos de gramos por milla, gramos por hora, o gramos por arranque, y depende de los procesos de emisión. Los factores de emisión dependen de los datos básicos de entrada referentes al área geográfica, año, mes o estación.

En el modo Emfac el modelo calcula una matriz de factores de emisión para unos valores específicos de temperatura (-20°F a 120°F), humedad relativa (0% a 100%), y velocidad de los vehículos (inactivo y de 1 mph a 65 mph) para cada combinación clase/tecnología. Para la realización de un estudio más detallado, una nueva ventana permite a los usuarios personalizar la elección de los parámetros de salida y seleccionar valores específicos de temperatura, humedad relativa y velocidad de los vehículos. La figura 4-17 muestra las diferentes opciones para los parámetros de salida en el modo Emfac.



**Figura 4-17: Pantalla de modelización de EMFAC2007**

Una vez realizada la ejecución del modelo en el modo Emfac, los archivos de salida que el programa ofrece al usuario son los siguientes:

**Binary Impacts (BIN):** Se trata de un archivo binario con extensión "bin". Este formato ofrece salidas compatibles con otros programas de ordenador.


**ASCII Impacts (ERP):** En este caso se obtiene un archivo de texto con extensión "erp". Este tipo de archivos se utilizan en inventarios de modelos del tipo DTIM.

**Rate Summary (RTS):** Este archivo tiene una extensión "rts". Se trata de un resumen en el cual las clases de vehículos se encuentran agrupadas para facilitar la realización de informes.

**Impact Rate Detail (RTL):** Este archivo proporciona información detallada de cada combinación clase/tecnología utilizada. Este archivo tiene una extensión "rtl" pero se

encuentra en formato CSV. Por lo tanto, cualquier programa de hoja de cálculo puede leerlo. Este archivo será el utilizado en este caso para obtener los datos necesarios para los factores de emisión buscados.

El paso posterior a la selección del tipo de archivo de salida consiste en definir los campos referentes a la temperatura, la humedad relativa, y la velocidad. Esto quiere decir que el usuario puede realizar una ejecución del modelo para distintos valores de esos parámetros, obteniendo un factor de emisión para cada caso. En las figuras 4-18 y 4-19 se muestran las pantallas de introducción de los datos de velocidad y temperatura para los cuales el usuario desea realizar el estudio, respectivamente.



**Select/Edit speed for Emfac calculations**

Enter data for speed. Click button to enable new value.

<input checked="" type="radio"/> Delete speed 1	33	<input type="radio"/> Delete speed 13	45
<input type="radio"/> Delete speed 2	34	<input type="radio"/> Delete speed 14	46
<input type="radio"/> Delete speed 3	35	<input type="radio"/> Delete speed 15	47
<input type="radio"/> Delete speed 4	36	<input type="radio"/> Delete speed 16	48
<input type="radio"/> Delete speed 5	37	<input type="radio"/> Delete speed 17	49
<input type="radio"/> Delete speed 6	38	<input type="radio"/> Delete speed 18	50
<input type="radio"/> Delete speed 7	39	<input type="radio"/> Delete speed 19	51
<input type="radio"/> Delete speed 8	40	<input type="radio"/> Delete speed 20	52
<input type="radio"/> Delete speed 9	41	<input type="radio"/> Delete speed 21	53
<input type="radio"/> Delete speed 10	42	<input type="radio"/> Delete speed 22	54
<input type="radio"/> Delete speed 11	43	<input type="radio"/> Delete speed 23	55
<input type="radio"/> Delete speed 12	44	<input type="radio"/> Delete speed 24	56

☒ Sort the array (done after exit)       

**Select/Edit temperature for Emfac calculations**

Enter data for temperature. Click button to enable new value.

<input checked="" type="radio"/> Delete temperature 1	90	<input type="radio"/> Enter temperature 13	
<input type="radio"/> Enter temperature 2		<input type="radio"/> Enter temperature 14	
<input type="radio"/> Enter temperature 3		<input type="radio"/> Enter temperature 15	
<input type="radio"/> Enter temperature 4		<input type="radio"/> Enter temperature 16	
<input type="radio"/> Enter temperature 5		<input type="radio"/> Enter temperature 17	
<input type="radio"/> Enter temperature 6		<input type="radio"/> Enter temperature 18	
<input type="radio"/> Enter temperature 7		<input type="radio"/> Enter temperature 19	
<input type="radio"/> Enter temperature 8		<input type="radio"/> Enter temperature 20	
<input type="radio"/> Enter temperature 9		<input type="radio"/> Enter temperature 21	
<input type="radio"/> Enter temperature 10		<input type="radio"/> Enter temperature 22	
<input type="radio"/> Enter temperature 11		<input type="radio"/> Enter temperature 23	
<input type="radio"/> Enter temperature 12		<input type="radio"/> Enter temperature 24	

☒ Sort the array (done after exit)       

**Figura 4-18 (izquierda): Pantalla de introducción de la velocidad de los vehículos**

**Figura 4-19 (derecha): Pantalla de introducción de la temperatura ambiente**

## ▪ Informe de Resultados

Después de haber introducido todos los parámetros de entrada requeridos y de haber seleccionado el modo de ejecución del modelo, el usuario debe pulsar el botón "Finish" (finalizar) y ejecutar el modelo a través del comando "Run" (ejecutar).

En el caso concreto del informe Impact Rate Detail (RTL), el usuario puede abrirlo con un programa tipo hoja de cálculo, como por ejemplo Microsoft Excel. El informe muestra los datos de salida en diferentes tablas, según contaminante, proceso de emisión, humedad relativa y temperatura. En la figura 4-20 se muestra un ejemplo de archivo de salida RTL.

**Figura 4-20: Archivo RTL de resultados de EMFAC2007**

## **5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE DISPERSIÓN A LOS PARÁMETROS DE ENTRADA (I)**

El primer objetivo específico de este proyecto es evaluar la sensibilidad del modelo de dispersión atmosférica CALINE4 para su utilización en el cálculo de las emisiones de gases contaminantes procedentes del tráfico rodado. A través de este estudio es posible analizar cuáles son los parámetros de entrada del modelo que afectan en mayor medida al cálculo de las emisiones. El procedimiento a seguir es sencillo: se trata de variar uno de los parámetros dentro de un rango de valores razonable, manteniendo el resto constante, y analizar cómo afecta este cambio a la concentración de contaminantes.

Los parámetros de entrada seleccionados para la realización de este análisis son aquéllos susceptibles de afectar en mayor medida a la concentración de los contaminantes. Éstos son:

- Velocidad de los vehículos
- Dirección del viento
- Volumen de tráfico
- Velocidad del viento
- Longitud del "link"

Adicionalmente, se realiza un estudio sobre el efecto que tendría la concentración de los vehículos en un solo carril sobre los receptores colocados en el resto de carriles, y otro sobre la influencia de la caracterización del tráfico en el cálculo del factor de emisión a partir de EMFAC2007.



En los siguientes apartados se expone la situación y características del área objeto de estudio, así como los valores de los parámetros de entrada fundamentales para la ejecución del modelo que fueron medidos in situ en la vía en cuestión como parte de una campaña de medidas previa, que se definirá más adelante. Además, un detallado análisis de los resultados obtenidos del estudio de sensibilidad del modelo para cada uno de los parámetros estudiados es explicado en cada una de las secciones correspondientes.

## 5.1 Descripción del escenario de estudio

Antes de presentar los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad realizado, es necesario describir las características fundamentales del escenario específico objeto de estudio, ya que dicho análisis tiene como objetivo fundamental determinar la aplicabilidad del modelo de dispersión atmosférica a este caso concreto.

Por lo tanto, el escenario seleccionado para el estudio desarrollado en este proyecto se enmarca dentro de la campaña de medidas realizada en el mes de julio del año 2008 en el kilómetro 3 de la carretera M-506, dentro del término municipal de Villaviciosa de Odón, en la Comunidad Autónoma de Madrid. Dicha campaña se desarrolló como parte del proyecto de investigación del LIR, el cual ya fue definido en la introducción de este trabajo.

Concretamente, se trata de un tramo de carretera por el cual circulan diferentes tipos de vehículos y cuya geometría se puede definir fácilmente en el modelo de dispersión. La mencionada carretera está compuesta por seis carriles, con una anchura total de 34 m, de los cuales los dos externos presentan menor circulación de vehículos por ser una salida hacia otra carretera y una vía de servicio, respectivamente. Se dispone además de una pasarela de peatones que cruza la carretera a una altura de 5,9 m, en la cual se colocó parte de la instrumentación necesaria para realizar las distintas mediciones. Por último, cabe destacar que el



tramo de carretera se encuentra situado entre dos rotondas separadas entre sí por una distancia aproximada de 1 km. En la figura 5-1 se puede observar una imagen real del tramo de carretera mientras que en la figura 5-2 se muestra un plano de situación del mismo, incluyendo las dos rotondas mencionadas anteriormente.



**Figura 5-1: Imagen real de la carretera objeto de estudio**



**Figura 5-2: Localización de la carretera objeto de estudio**

Fuente: Elaboración propia a partir de Nokia Maps (Web [10])



### **5.1.1 Instrumentación utilizada en la campaña de medidas**

Una vez introducido el escenario sobre el cual se va a trabajar, es conveniente además realizar una breve explicación de la instrumentación utilizada en la ya mencionada campaña de medidas para la obtención de los parámetros de entrada del modelo.

Tal y como se mencionó en la introducción, la medida experimental de emisiones puede realizarse a partir de la caracterización del tráfico que circula por la vía o a partir de la inversión del modelo de dispersión atmosférica. Para la primera metodología, se necesita un Sistema de Caracterización del Tráfico (SCT) que proporcione los datos de tráfico requeridos para realizar los cálculos de emisiones según la metodología EMEP-CORINAIR. Para la comprobación experimental de esta metodología, es necesario realizar numerosas medidas 'in situ' tanto para obtener los datos requeridos en la ejecución del modelo de dispersión como las concentraciones experimentales con las que contrastar los resultados del modelo y, por consiguiente, los factores de emisión calculados. Para el cálculo de las emisiones mediante la inversión del modelo de dispersión también se necesitan estos últimos datos.

Por otro lado, para medir los datos de las variables meteorológicas requeridas para el modelo resulta necesaria la utilización de una estación meteorológica, mientras que para obtener los valores de concentración en las proximidades de la vía, se han utilizado dos instrumentos basados en tecnologías de medida distintas: el sistema de teledetección infrarroja Open-Path FTIR y el medidor puntual de contaminación Airpointer.

A continuación se detallan las características principales de la instrumentación introducida anteriormente.

### 5.1.1.1 Sistema de Caracterización del Tráfico

El SCT es un sistema diseñado por la Universidad Europea de Madrid en colaboración con la Universidad Carlos III de Madrid. Está basado en sensores de ultrasonidos que miden la distancia entre la pasarela y la vía. Cuando pasa un vehículo, esa distancia disminuye y, a partir de la altura, se puede inferir qué tipo de vehículo es. Es un sistema modular que consta de tantos pares de sensores como carriles tiene la vía. La velocidad puede obtenerse a partir de la anchura de la pasarela y de la diferencia de tiempos entre los dos sensores de cada par, ya que cada sensor está situado a un lado de la pasarela peatonal sobre el mismo carril. En la figura 5-3 pueden verse varios módulos situados sobre la pasarela.



**Figura 5-3: SCT dispuesto en la pasarela sobre la carretera de estudio**

Fuente: Briz et al, "Metodología y sistema de medida para el cálculo experimental de emisiones contaminantes asociadas al tráfico rodado", 2009

### 5.1.1.2 Estación meteorológica

Los parámetros meteorológicos necesarios para la ejecución del modelo de dispersión atmosférica obtenidos a través de la estación meteorológica son: temperatura, humedad relativa, presión, radiación solar y viento. Los sensores

utilizados para medir estas variables se disponen en un trípode a una altura de 2 m (ver figura 5-4).

Cabe destacar el sensor sónico que proporciona datos de velocidad y dirección del viento en las tres direcciones. Dado que los modelos de dispersión atmosférica son especialmente sensibles a la velocidad del viento (Ganguly, 2008), es muy importante que se disponga de este dato con la precisión que aporta este tipo de sensor de viento (Briz et al, 2009).



**Figura 5-4: Estación meteorológica instalada sobre la pasarela**

Fuente: Briz et al, "Metodología y sistema de medida para el cálculo experimental de emisiones contaminantes asociadas al tráfico rodado", 2009

### **5.1.1.3 Sistema Airpointer**

Por su parte, la plataforma de medida de gases Airpointer es un sistema diseñado para medir la concentración de CO, NO y NO<sub>2</sub> en inmisión. Este sistema dispone de una bomba que toma una muestra de aire del exterior y lo introduce en el sistema para ser analizada. Los sensores utilizados siguen los métodos de

referencia establecidos por la EPA y por la EEA. Para la detección de CO emplea la técnica de infrarrojo no dispersivo (NDIR), mientras que para la detección de NOx utiliza una técnica basada en quimiluminiscencia. Para seguir la normativa, el sistema cuenta con un sistema de aire acondicionado que permite mantener los sensores a una temperatura adecuada y cumplir así con la normativa.

Tanto los sensores como el sistema de refrigeración van alojados en un compartimento, estanco, compacto y de reducidas dimensiones (ver figura 5-5). Este sistema multigas tiene un rendimiento equivalente al de los sistemas de medida instalados en casetas, pero su reducido tamaño permite que sea utilizado como un sistema portátil que puede ser instalado en un poste, aunque manteniendo las mismas prestaciones (Briz et al, 2009). En la figura 5-5 puede observarse el Sistema Airpointer ubicado sobre la pasarela dentro de la carretera objeto de estudio.



**Figura 5-5: Estación meteorológica instalada sobre la pasarela**

Fuente: Briz et al, "Metodología y sistema de medida para el cálculo experimental de emisiones contaminantes asociadas al tráfico rodado", 2009

#### 5.1.1.4 Sistema Open-Path FTIR

Este es un sistema de teledetección infrarroja basado en la técnica de monitorización de gases contaminantes mediante espectroscopía por Transformada de Fourier en el Infrarrojo (FTIR), técnica bien establecida y ampliamente aplicada al análisis de medidas extractivas de gases en laboratorio. La técnica de detección remota Open-Path FTIR se fundamenta en el mismo principio: cada gas muestra un espectro característico de absorción. Observando el espectro de absorción pueden determinarse los gases presentes en la muestra y cuantificar su concentración.

El espectro de absorción se obtiene al medir la radiación que proviene de una fuente IR después de hacer que esta radiación atraviese el gas que se quiere analizar. En el caso de la técnica Open-Path FTIR, la fuente IR que se emplea es una resistencia de carburo de silicio situada en el foco de un espejo parabólico que concentra el haz hacia delante. La radiación IR que sale de la fuente atraviesa la atmósfera, donde algunas longitudes de onda son absorbidas por los gases presentes. La radiación llega al espectrorradiómetro FTIR, donde un interferómetro de Michelson analiza en longitudes de onda la radiación. En la figura 5-6 puede observarse el espectrorradiómetro montado sobre un telescopio. Por su parte, en la figura 5-7 se muestra el sistema Open-Path FTIR dispuesto a lo largo de la pasarela, es decir el espectrorradiómetro y la fuente IR alineados para medir los gases presentes entre ambos. El software de análisis proporciona las concentraciones de los diferentes gases partir de este espectro de absorción (Briz et al, 2009).

Esta técnica de teledetección aporta una ventaja extraordinaria: con una sola medida se pueden detectar simultáneamente la mayoría de los gases de interés medioambiental y calcular la concentración media entre la fuente y el FTIR. Además la técnica Open-Path FTIR incorpora las ventajas de una técnica no intrusiva: no se requiere ningún tipo de recogida de muestras (lo que evita la alteración del gas a analizar, la necesidad de acceder a lugares difícilmente practicables o peligrosos, proporciona resultados en tiempo real) y permite medir de forma integrada la composición química de la atmósfera de una región sin necesidad de recoger y



promediar varias muestras, lo que conlleva a que esta técnica tenga menor coste que las técnicas extractivas tradicionales. Pero lo más importante es su capacidad para promediar una zona, especialmente en este problema, dada la gran variabilidad espacial del CO (Lindén et al, 2007).



**Figura 5-6 Sistema FTIR sobre telescopio**

Fuente: Briz et al, "Metodología y sistema de medida para el cálculo experimental de emisiones contaminantes asociadas al tráfico rodado". 2009



**Figura 5-7 Sistema Open-Path (FTIR + fuente IR)**

Fuente: Briz et al, "Metodología y sistema de medida para el cálculo experimental de emisiones contaminantes asociadas al tráfico rodado". 2009

## 5.2 Datos de entrada

En apartados anteriores se explicó la utilización de CL4 como herramienta para ejecutar el modelo de dispersión atmosférica CALINE4 y de EMFAC2007 para el cálculo de los factores de emisión necesarios para dicha ejecución. En esta ocasión se trata precisamente de definir los valores de los parámetros de entrada necesarios para la obtención de la concentración de contaminantes y de su posterior estudio mediante el análisis de sensibilidad realizado.

Puesto que los factores de emisión son imprescindibles para la ejecución de CALINE4, se procede a detallar primero los datos utilizados para la obtención de los mismos a través de EMFAC2007, para más tarde hacer lo mismo con el modelo de dispersión.

### 5.2.1 EMFAC2007

Para definir los parámetros de entrada utilizados en EMFAC2007 se actúa del mismo modo que se explicó en el apartado correspondiente a la ejecución del programa (apartado 4.3.3.1). Por lo tanto, los datos necesarios para obtener los factores de emisión en este caso concreto son los siguientes:

- **Geographic area:** Puesto que EMFAC2007 sólo contempla regiones ubicadas dentro del territorio correspondiente al Estado de California en Estados Unidos, es necesario relacionar las características de la región del estudio con aquellas definidas en el modelo. Un estudio previo (Gali, 2008) demostró que la ciudad de Sacramento es la que presenta unos valores climatológicos normales más parecidos a los que se encuentran en Madrid. Por lo tanto, en este estudio se ha considerado la ciudad de Sacramento para la obtención de los factores de emisión.
- **Calendar years:** En este campo se ha seleccionado el año **2008**, que es precisamente cuando se realizó la campaña de medidas.





- **Season or month:** Se selecciona **Julio** ya que fue el mes de realización de la toma de datos.
- **Scenario title:** Velocidad vehículos.
- **Model years:** Se ha determinado el rango comprendido entre **1990 y 2008** ya que no se considera la presencia de vehículos de más de 18 años de antigüedad.
- **Vehicle classes:** Los tipos de vehículos considerados en la realización del estudio dentro de las 13 posibilidades que ofrece EMFAC2007 son:
  - **Passenger Cars:** Turismos
  - **Light-Duty Trucks:** Vehículos de carga Ligeros
  - **Medium-Duty Trucks:** Vehículos de carga Medianos
  - **Urban Buses:** Autobuses Urbanos
  - **Other Buses:** Otros Autobuses
  - **Motorcycles:** Motocicletas
- **I/m program schedule:** Se selecciona la opción por defecto tal y como recomienda la guía del programa.
- **Mode:** Se elige el modo **Emfac – Area fleet average emissions**, de modo que se obtengan los factores de emisión buscados.
- **Mode Emfac outputs:** En este campo el programa pide determinar los valores existentes para la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad de los vehículos. Concretamente en este caso se han establecido los siguientes valores:
  - Temperature: Se ha definido una temperatura de **90°F (32°C)** que se corresponde con la medida que se obtuvo a través de la estación



meteorológica dentro de la campaña de medidas en la que se basa este estudio.

- Relative Humidity: En este caso se establece una humedad relativa del **12%** que fue determinada con la misma estación meteorológica que la temperatura.
- Speed: En el caso de la velocidad de los vehículos, y teniendo en cuenta que posteriormente se realizará un análisis de sensibilidad para este parámetro, se han introducido velocidades dentro del rango **33-80 mph** (millas por hora) con incrementos de tan solo 1 mph. Esos valores de velocidad se corresponden, en kilómetros por hora, al rango **53-129 km/h** estableciendo que 1 milla equivale a 1,609 kilómetros. Es necesario mencionar que EMFAC2007 sólo permite definir 24 valores distintos para la velocidad en una misma ejecución del modelo, por lo que se han realizado dos ejecuciones distintas con los siguientes rangos de velocidades:

- Ejecución 1: 33-56 mph
- Ejecución 2: 57-80 mph

El resto de campos referentes a los datos de salida de las partículas se dejan por defecto en este caso, pudiéndose variar a preferencia del usuario.

Una vez introducidos todos los parámetros de entrada definidos anteriormente, el usuario puede realizar una ejecución del modelo y obtener los datos de factores de emisión deseados. Los datos obtenidos en este caso se muestran en el apartado referente al análisis de sensibilidad.



## 5.2.2 CALINE4

En este apartado se detallan todos los datos que han de ser introducidos en el modelo de dispersión para su correcta ejecución. Es importante hacer notar que el programa sólo permite la entrada de datos con una cifra decimal, por lo que habrá que redondear cuando sea necesario. Este hecho podría conllevar la obtención de resultados poco precisos a la hora de realizar el análisis de sensibilidad, lo cual se comprobará en el apartado correspondiente.

Para una mejor comprensión, a continuación se exponen los parámetros de entrada según el orden que indica el programa, el cual fue definido en el apartado referente a la introducción del modelo CALINE4 (ver apartado 4.3.2.2).

### ▪ Pantalla JOB PARAMETERS

Job Title: **Análisis Sensibilidad**

Run Type: **Standard**

Aerodynamic Roughness Coefficient: **Suburban (RC = 100 cm)**

Model Information: En este apartado se definen los siguientes campos:

- Link/Receptor Geometry Units: **Meters (metros).**
- Altitude Above Sea Level (Altura sobre el nivel del mar): **682 m**

### ▪ Pantalla LINK GEOMETRY

Number of links: **1 link**, el cual se ha representado como un segmento de **400 m** de longitud localizado en el eje central de la carretera, es decir, a **17 m** de los extremos de la misma.

Link Type: **At-Grade**

Coordenadas: **x1: 17, y1: 0; x2: 17, y2: 400.**

Link Height: **0 m**

Mixing Zone Width (Anchura de la zona de mezcla): **40 m**, que se corresponden con los 34 m del ancho de la carretera más 3 m por cada lado de la misma, según se explicó en el apartado referente a la introducción de datos en CALINE4.

#### ▪ **Pantalla LINK ACTIVITY**

Traffic Volume (Volumen de tráfico, en vehículos por hora - vph): El valor establecido es de **2750 vph**, el cual se corresponde con un valor medio de vehículos calculado a partir de los datos de la campaña de medidas realizada en Julio de 2008 en el escenario de estudio.

Emission factor (Factor de emisión en gramos por milla - g/milla): Se trata del valor obtenido mediante la ejecución de EMFAC2007, explicado anteriormente. Concretamente, y tal y como recomienda la guía de CALINE4, se ha escogido el valor del factor de emisión para una velocidad que se puede considerar como peor escenario posible dentro de las medidas realizadas. Es decir, se ha seleccionado una velocidad de los vehículos experimental de 115 km/h, la cual supera ligeramente el límite de velocidad de la carretera, pero cumple con el criterio recomendado por la guía del modelo. El valor del factor de emisión obtenido para esa velocidad es de **3,906 g/milla**, que se introduce en el programa como 3,9 para ser consecuente con la precisión del modelo de dispersión.

#### ▪ **Pantalla RUN CONDITIONS**

Wind Speed (Velocidad del viento, en metros por segundo – m/s): La velocidad del viento es uno de los parámetros objeto de estudio en el análisis de sensibilidad, por lo cual su valor varía según las necesidades de dicho análisis. Sin embargo, cuando el estudio se centra en otro parámetro de entrada, el valor de la velocidad del viento se fija en **1,7 m/s**, el cual fue determinado con la estación meteorológica utilizada en la campaña de medidas descrita con anterioridad.

Wind Direction (Dirección del viento, en grados): El programa permite valores desde 0° hasta 360°. En este caso, el valor introducido en el modelo también depende de las necesidades del análisis de sensibilidad correspondiente. Cuando se trata como un parámetro fijo, el valor establecido es de **137°**, el cual fue determinado mediante el algoritmo de Yamartino a partir de los datos horarios de dirección de viento medidos en la campaña de medidas de Julio de 2008 (Gali, 2008). Este valor también podría haber sido calculado por medio de una simple media aritmética.

Wind Direction Standard Deviation (Desviación estándar de la dirección del viento, en grados): También se calculó en la campaña de 2008 a través del algoritmo de Yamartino, y el valor obtenido fue de **5°**.

Atmospheric Stability Class (Clase de estabilidad atmosférica): Se define según las clases establecidas por Turner y utilizando la equivalencia Turner-Pasquill, definida en el apartado 4.3.2.2. Con ello, se ha determinado una clase de estabilidad **B: Inestable**, que se corresponde con el número **2** de la clasificación de Turner.

Mixing Height (Altura de la mezcla, en metros): El valor de este parámetro se ha estimado en **1000 m**, teniendo en cuenta que valores razonables de la altura de mezcla no suelen tener un impacto significativo en los resultados ofrecidos por CALINE4, según indica la guía del programa. Como referencia se ha seleccionado un inventario de datos ofrecidos por la Red de Meteorología del Ayuntamiento de Madrid (Web [18]), en el cual la altura de mezcla no llega a superar en ningún momento los 1000 m.

Ambient Temperature (Temperatura ambiente, en grados): Se ha fijado, al igual que en el caso de EMFAC2007, un valor de **32°C**.

Ambient Pollutant Concentration (Valor de la concentración de fondo, en partes por millón – ppm): Se ha estimado un valor de **0,2 ppm**.

## ▪ Pantalla RECEPTOR POSITIONS

Number of receptors: En un principio se definieron **6 receptores** ubicados a lo largo de la anchura de la carretera y distanciados 6,8 m entre ellos, para así abarcar los 6 carriles estudiados. En un análisis posterior se consideraron seis receptores más que serán definidos más adelante. En la figura 5-8 se puede observar un esquema explicativo de la ubicación de los receptores con respecto a los límites de la carretera y el link definido previamente. La distancia de 218 m correspondiente a la ubicación de los receptores con respecto al origen del link pretende recrear de una manera exacta la situación de los receptores reales ubicados en la pasarela del escenario de estudio.

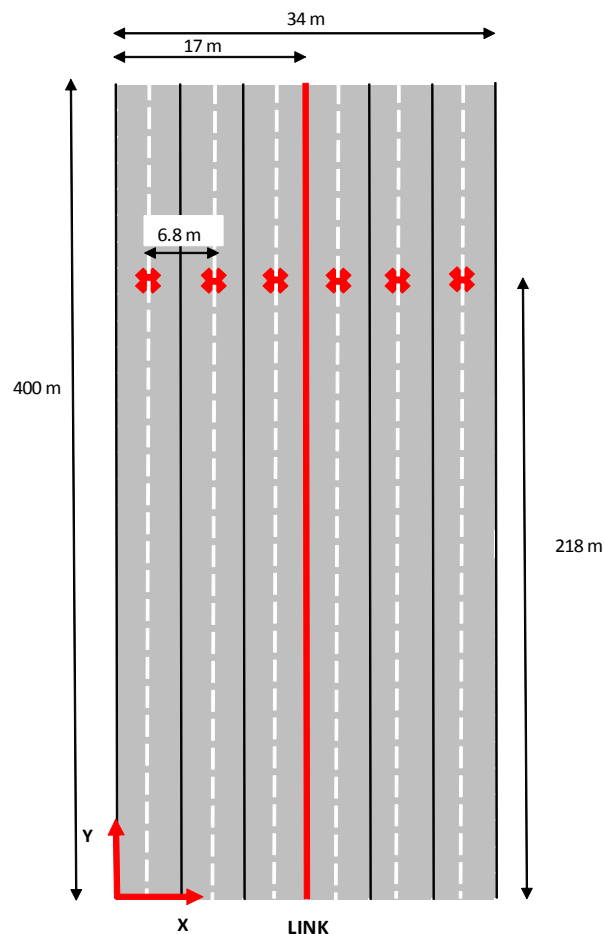


Figura 5-8: Esquema de la disposición del link y los receptores en el escenario de estudio



## 5.3 Resultados del Análisis de Sensibilidad

El objetivo de este estudio es la obtención de valores de concentración para las emisiones contaminantes a partir de los cuales se puedan definir los parámetros que son más influyentes en la variación de dichas emisiones. Para ello, se procede mediante la variación progresiva del valor de un determinado parámetro manteniendo constante el valor del resto, de modo que se pueda visualizar en qué medida afecta esa variable al resultado final.

Diversos autores han realizado también interesantes análisis de sensibilidad del modelo de dispersión CALINE4 que son explicados a continuación. Estos estudios previos sirven de punto de partida para la realización de esta parte del proyecto, ya que a partir de ellos se puede esclarecer qué campos han sido ya ampliamente estudiados, viendo qué resultados podrían ser aplicables a este caso concreto y analizando los parámetros susceptibles de ser objetivo de un análisis más exhaustivo.

Sripraparkorn et al (2001) realizaron en su estudio de la calidad del aire en Bangkok un amplio análisis de sensibilidad del modelo CALINE4, cuantificando el impacto de la variación de diferentes parámetros de entrada en el cálculo final de las emisiones. En la figura 5-9 se muestra el resultado de este estudio. El análisis de sensibilidad fue realizado mediante la variación de un solo parámetro de entrada manteniendo el resto en un valor fijo. Para cada caso, el valor del mencionado parámetro objeto de estudio se incrementaba un 100% desde un valor inicial y se obtenía, de tal manera, la variación en tanto por ciento de la concentración de emisiones.

Parameter	% changed	Parameter	% changed
Vehicle Volume	70.58	Temperature	5.04
Composite Emission Factor	57.37	Ambient Pollutant Concentration	12.63
Wind Speed	14.52	Distance of Receptor	17.32
Wind Direction	81.92	Height of Receptor	61.95

**Figura 5-9: Porcentaje de cambio de los resultados por la variación de cada uno de los parámetros de entrada.**

Fuente: Sripraparkorn et al, "Application of the CALINE4 air quality model and the TSI DustTrak for the prediction and measurement of roadside particulate matter and carbon monoxide levels in Bangkok", 2003

Como muestran los resultados obtenidos, el parámetro dominante sería la dirección del viento. Esto resulta razonable cuando se habla de un estudio llevado a cabo dentro de un área delimitada. En este caso concreto realizado en Tailandia se observaron grandes variaciones en la dirección del viento a partir de las 18:00, registrándose valores que iban desde 1º hasta 286º, siempre tomando como referencia el eje de la carretera.

Otro factor determinante sería el volumen de vehículos. Parece un resultado obvio ya que el mayor número de vehículos circulando dentro del área de estudio afecta en gran medida a los valores de concentración de la zona. Concretamente en el estudio se observa una gran variación en el número de vehículos entre las 7:00 y las 9:00 de la mañana dentro del área determinada, en este caso una carretera de Bangkok, por lo que este factor es especialmente dominante en los resultados de concentración medidos en esa franja horaria.

En conclusión, este estudio muestra como los factores más determinantes en los resultados del modelo de dispersión son la dirección del viento, el volumen de los vehículos, la altura de los receptores y el factor de emisión. Por el contrario, los parámetros de entrada menos determinantes en este caso serían la velocidad del viento, la temperatura o la concentración de fondo establecida.



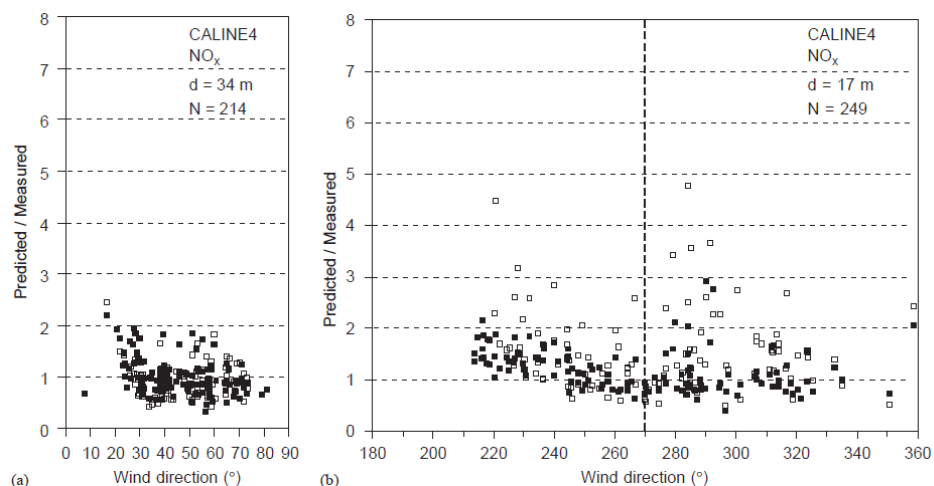


Otro estudio muy interesante fue el realizado por Levitin et al (2005) en una carretera de Elimäki, en Finlandia. La base del estudio es la evaluación de los modelos de dispersión CALINE4 y CAR-FMI (Contaminants in the Air from a Road – Finnish Meteorological Institute) contra las medidas experimentales tomadas en las cercanías de la ya mencionada carretera de la ciudad finlandesa.

CAR-FMI es un modelo desarrollado por el Instituto Meteorológico de Finlandia y cuyo principal objetivo es la investigación acerca de las influencias medioambientales de las emisiones procedentes del tráfico rodado. Ambos modelos, CALINE4 y CAR-FMI, utilizan la misma solución analítica para las reacciones químicas de los óxidos de nitrógeno, oxígeno y ozono. Sin embargo, los modelos se diferencian en la manera en la que combinan las ecuaciones de transformación con el modelo de dispersión.

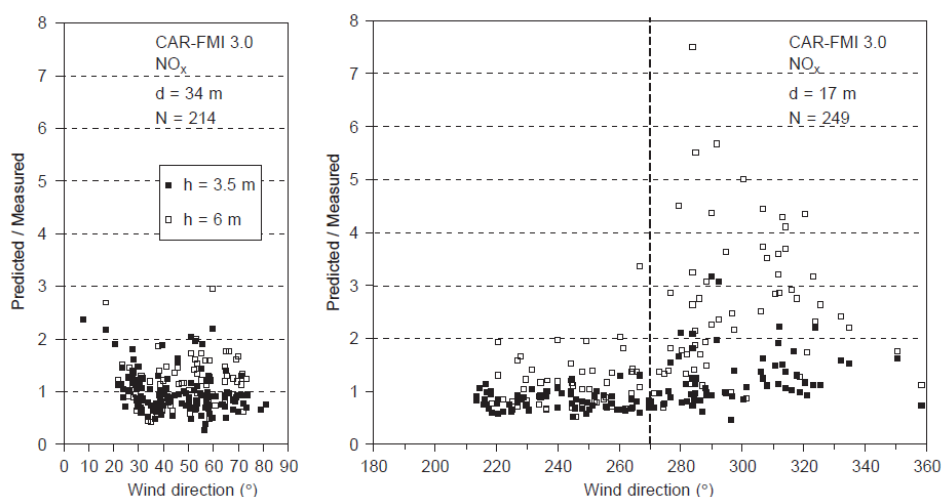
Los principales resultados arrojados por este estudio muestran el comportamiento de ambos modelos frente a los resultados reales medidos en la carretera. En general, dicho comportamiento se distancia de lo observado en la realidad a medida que la velocidad del viento disminuye así como la dirección del viento es aproximadamente paralela a la carretera. En la figura 5-10 se muestra el ratio entre el valor estimado por el modelo CALINE4 para los NO<sub>x</sub> y el calculado directamente en la carretera para diferentes valores de la dirección del viento. Como se puede observar, existen algunos valores anormalmente altos para direcciones del viento entre 220° y 230° y entre 280° y 300°. Lo mismo sucede cuando se utiliza el modelo CAR-FMI, figura 5-11, con valores altos dentro del rango 260°-330°. A modo de justificación, el estudio concluye afirmando que los valores del ratio mucho mayores que 1 podrían estar debidos, en parte, a la imprecisión de los aparatos de medida utilizados. La diferencia entre los puntos blancos y negros en ambas gráficas viene dada por la altura a la que se colocaron los receptores con respecto al nivel del suelo, según se puede consultar en la leyenda de la figura 5-11.

A la vista de los resultados de esta revisión bibliográfica, los parámetros que se van a analizar en este proyecto son los que se muestran como relevantes en las referencias consultadas (velocidad y dirección del viento, volumen de tráfico, factor de emisión) y otros de interés particular para nuestro caso (longitud del link, velocidad de los vehículos e influencia de un carril sobre otros).



**Figura 5-10: Ratio de concentraciones de NOx previstas frente a experimentales en función de la dirección del viento, utilizando CALINE4**

Fuente: Levitin et al, "Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road", 2005



**Figura 5-11: Ratio de concentraciones de NOx previstas frente a experimentales en función de la dirección del viento, utilizando CAR-FMI 3.0**

Fuente: Levitin et al, "Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road", 2005



### 5.3.1 Velocidad de los vehículos

Para el análisis de sensibilidad desarrollado en este proyecto, el primero de los parámetros objeto de estudio es la velocidad de los vehículos. Para ello, se calculan primero los factores de emisión con la ayuda de EMFAC2007 para un rango de velocidades que va desde 33 hasta 80 mph (53-129 km/h, aproximadamente), siendo éste de manera aproximada el rango de velocidades que se detectaron en la campaña de medidas. Con el objetivo de obtener una gráfica lo más precisa posible, el intervalo de variación de la velocidad es de 1 mph, con lo que finalmente se obtienen 48 medidas diferentes para el factor de emisión, que se introducen posteriormente en el modelo de dispersión para obtener la concentración final de contaminantes. La decisión de elegir un rango de velocidades relativamente amplio y un incremento pequeño en comparación, surge a raíz de la necesidad de obtener un estudio que cubra todas las situaciones posibles en el área de estudio, incluidas aquéllas consideradas como peor escenario posible.

Tal y como se explicó en la parte correspondiente al uso de EMFAC2007, se introducen los datos de entrada en el programa y se ejecuta hasta obtener como resultado un factor de emisión para cada uno de los valores de velocidad. Dado que los demás parámetros permanecen constantes, se puede analizar así la dependencia de los resultados.

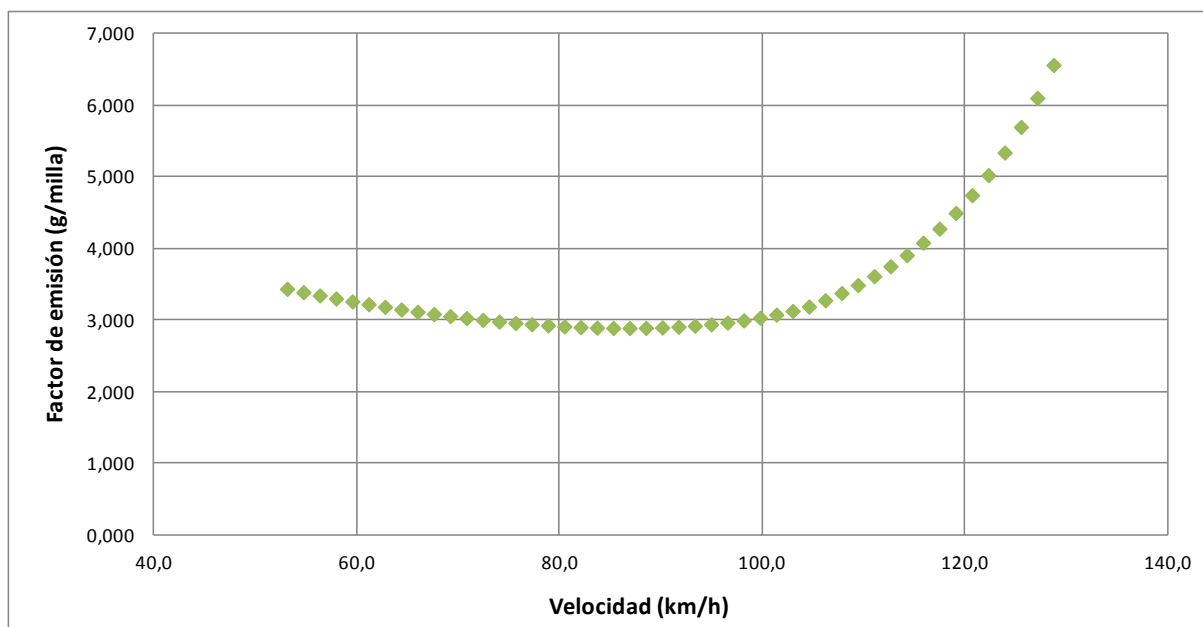
Los resultados arrojados por el programa son expuestos en la tabla 5-1, así como el valor utilizado para los demás parámetros de entrada al modelo. A modo de aclaración, es importante mencionar que los datos reflejan valores del factor de emisión correspondientes al monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono para cada una de las velocidades estudiadas. Sin embargo, para la medida final de la concentración sólo se utilizan los correspondientes al monóxido de carbono. El motivo de esta decisión se basa en el hecho de que es previsible el mismo comportamiento para el dióxido de carbono y, por otro lado, los procesos de fotólisis del NO<sub>2</sub> a NO pueden introducir variaciones que podrían ser atribuidas erróneamente a los parámetros de estudio.



DATOS			RESULTADOS							
Parámetros fijos			Parámetro variable		Factores de emisión (EMFAC 2007) gramos/milla		Factores de emisión (EMFAC 2007) gramos/milla		Factores de emisión (EMFAC 2007) gramos/milla	
Temperature 90 F = 32°C			Velocidad vehículos		Running exhaust emissions		Running exhaust emissions		Running exhaust emissions	
Relative Humidity 12%			mph	km/h	Pollutant name: Carbon Monoxide		Pollutant name: Oxides of Nitrogen		Pollutant name: Carbon Dioxide	
Traffic Volume (vph) 2750										
Wind Speed 1,7 m/s			33	53,1		3,435		0,353		438,483
Wind Direction 137º			34	54,7		3,388		0,350		431,524
Wind Direction Standard Deviation 5º			35	56,3		3,343		0,347		425,321
Atmospheric Stability Class 2			36	57,9		3,300		0,345		419,842
Mixing Height 1000 m			37	59,5		3,259		0,343		415,055
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm			38	61,2		3,220		0,341		410,936
			39	62,8		3,183		0,340		407,459
			40	64,4		3,147		0,338		404,606
			41	66,0		3,114		0,338		402,358
			42	67,6		3,083		0,337		400,702
			43	69,2		3,054		0,336		399,624
			44	70,8		3,026		0,336		399,115
			45	72,4		3,001		0,336		399,168
			46	74,0		2,978		0,337		399,778
			47	75,6		2,958		0,338		400,941
			48	77,2		2,940		0,339		402,657
			49	78,9		2,924		0,340		404,928
			50	80,5		2,910		0,341		407,758
			51	82,1		2,900		0,343		411,151
			52	83,7		2,892		0,345		415,118
			53	85,3		2,888		0,348		419,669
			54	86,9		2,887		0,351		424,817
			55	88,5		2,889		0,354		430,578
			56	90,1		2,895		0,357		436,971
			57	91,7		2,905		0,361		444,019
			58	93,3		2,919		0,365		451,746
			59	95,0		2,939		0,370		460,182
			60	96,6		2,963		0,375		469,359
			61	98,2		2,994		0,380		479,314
			62	99,8		3,031		0,386		490,088
			63	101,4		3,075		0,393		501,729
			64	103,0		3,126		0,400		514,287
			65	104,6		3,187		0,407		527,823
			66	106,2		3,276		0,410		527,977
			67	107,8		3,376		0,412		528,060
			68	109,4		3,488		0,415		528,066
			69	111,0		3,612		0,418		527,992
			70	112,7		3,751		0,421		527,833
			71	114,3		3,906		0,424		527,588
			72	115,9		4,080		0,428		527,253
			73	117,5		4,276		0,432		526,827
			74	119,1		4,496		0,437		526,312
			75	120,7		4,744		0,442		525,705
			76	122,3		5,024		0,447		525,011
			77	123,9		5,340		0,453		524,232
			78	125,5		5,698		0,460		523,373
			79	127,1		6,103		0,467		522,439
			80	128,7		6,564		0,475		521,437

Tabla 5-1: Factor de emisión en función de la velocidad de los vehículos para diferentes tipos de contaminante

Con el fin de obtener una visión más clara de los resultados, en la figura 5-12 se muestran los valores reflejados en la tabla anterior para el factor de emisión en función de la velocidad de los vehículos.



**Figura 5-12: Factor de emisión (g/milla) para el CO en función de la velocidad de los vehículos (km/h)**

El análisis que se obtiene de los resultados es que el factor de emisión crece de una manera considerable a partir de una velocidad en torno a 100 km/h. En este sentido los datos son interesantes teniendo en cuenta que la velocidad de los vehículos en el tramo de estudio se encuentra dentro del rango 90-110 km/h, según los datos obtenidos en la campaña de medidas. Por lo tanto, aquellos vehículos que circulan a una velocidad por encima del límite de velocidad de la carretera (90 km/h) contribuyen en mayor medida a la emisión de contaminantes a la atmósfera. Para valores de velocidad comprendidos en el rango 70-100 km/h el factor de emisión permanece prácticamente constante mientras que los vehículos que circulan más lentamente presentan un factor de emisión ligeramente más elevado.

Tal y como se explicó en la introducción al modelo de dispersión CALINE4, los valores del factor de emisión obtenidos con EMFAC2007 junto con el resto de parámetros necesarios que se mantienen constantes son introducidos en CALINE4



para obtener la concentración en partes por millón de las emisiones de monóxido de carbono.

Los resultados se encuentran en la tabla 5-2. En esta tabla, así como en el resto que aparecen en este trabajo, se muestran los valores de los datos de entrada del modelo CALINE4. En la tabla se muestra además el valor de la concentración que capta cada uno de los 6 receptores que se consideran en la ejecución del modelo, y el valor medio calculado a partir de ellos. Además, y al igual que para el caso de los factores de emisión, los valores de concentración calculados con CALINE4 son representados en la figura 5-13 para su mejor análisis.

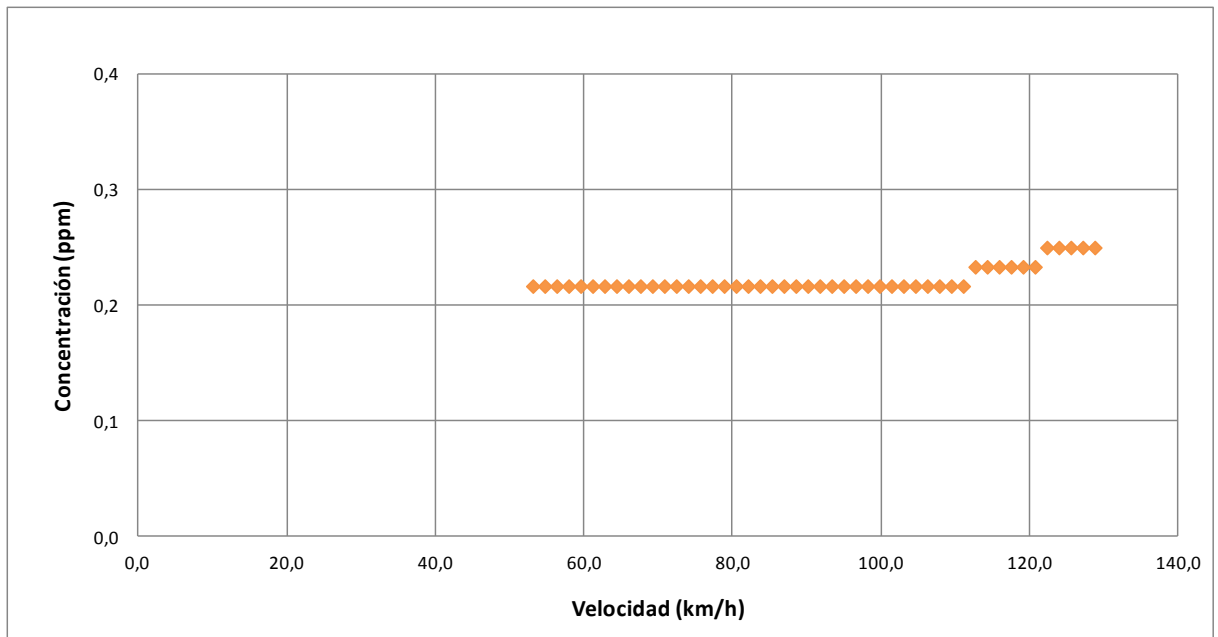
De este modo, y comparando las gráficas correspondientes a los factores de emisión y las concentraciones de CO, se puede ver un aumento notable en ambos casos para velocidades mayores a 100 km/h. Sin embargo, en el caso de las concentraciones, CALINE4 ofrece unos resultados más escalonados que no muestran gran variación de la concentración de CO. Con esto se deduce que el modelo de dispersión no resulta tan sensible para variaciones pequeñas de la velocidad de los vehículos. Este resultado tiene fuertes implicaciones también en el diseño del SCT ya que, a la vista de la poca sensibilidad del modelo de dispersión atmosférica a la velocidad, no se requiere que este sistema proporcione este dato con una gran precisión. Por tanto, bastará con que proporcione el rango de velocidades que llevan los vehículos que circulan por la vía. No obstante, los requerimientos de precisión en velocidades altas son más fuertes, puesto que los valores de velocidad sí repercuten en las emisiones lo suficiente para que se aprecie en la concentración.

El hecho de que CALINE4 ofrezca valores de concentración con una precisión de tan sólo una cifra decimal es la razón de que se obtengan estos resultados. Por lo tanto, se obtiene que para distintos valores del factor de emisión y manteniendo el resto de parámetros constante, la concentración de CO no varía para determinados rangos de velocidad.



DATOS				RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable		Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Velocidad vehículos								
Relative Humidity 12%		mph	km/h	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750										
Wind Speed 1,7 m/s		33	53,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction 137º		34	54,7	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction Standard Deviation 5º		35	56,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Atmospheric Stability Class 2		36	57,9	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mixing Height 1000 m		37	59,5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		38	61,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		39	62,8	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		40	64,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		41	66,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		42	67,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		43	69,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		44	70,8	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		45	72,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		46	74,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		47	75,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		48	77,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		49	78,9	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		50	80,5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		51	82,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		52	83,7	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		53	85,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		54	86,9	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		55	88,5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		56	90,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		57	91,7	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		58	93,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		59	95,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		60	96,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		61	98,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		62	99,8	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		63	101,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		64	103,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		65	104,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		66	106,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		67	107,8	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		68	109,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		69	111,0	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		70	112,7	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		71	114,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		72	115,9	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		73	117,5	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		74	119,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		75	120,7	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		76	122,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		77	123,9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		78	125,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		79	127,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		80	128,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2

Tabla 5-2: Concentración de CO en función de la velocidad de los vehículos



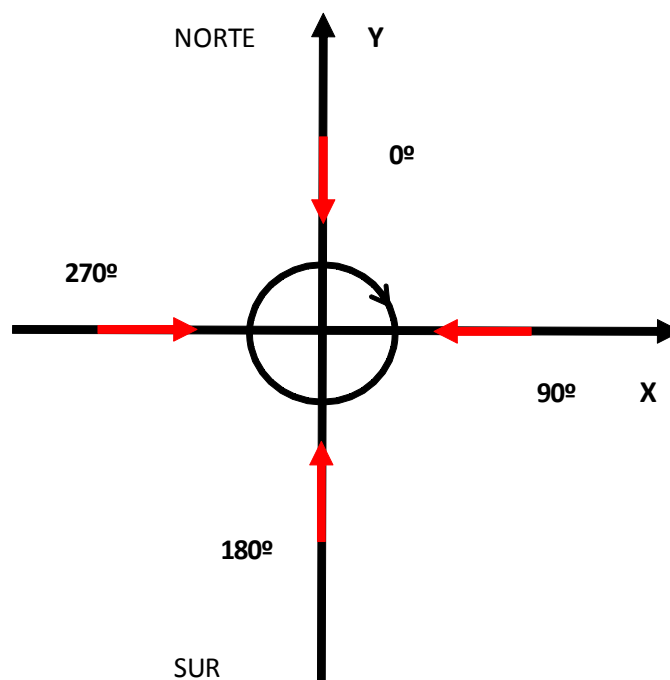
**Figura 5-13: Concentración de CO en función de la velocidad de los vehículos**

### 5.3.2 Dirección del viento

El segundo parámetro que se estudia en este análisis es la dirección del viento, la cual será utilizada además en posteriores estudios dada su importancia a la hora de obtener resultados de concentración en el área de estudio.

En primer lugar, es necesario establecer el sistema de coordenadas de referencia que se utiliza en el modelo para definir el valor de la variable. Tal y como se explicó en el apartado referente a la introducción de parámetros de entrada en CALINE4 (ver apartado 4.3.2.2), el sistema de coordenadas establecido para la dirección del viento parte de un valor  $0^\circ$  en la dirección del eje Y, desde el norte, y el ángulo se incrementa en sentido horario desde ese punto ( $0^\circ$ =Norte,  $90^\circ$ =Este,  $180^\circ$ =Sur,  $270^\circ$ =Oeste). En la figura 5-14 se muestra una representación del sistema de coordenadas descrito previamente.





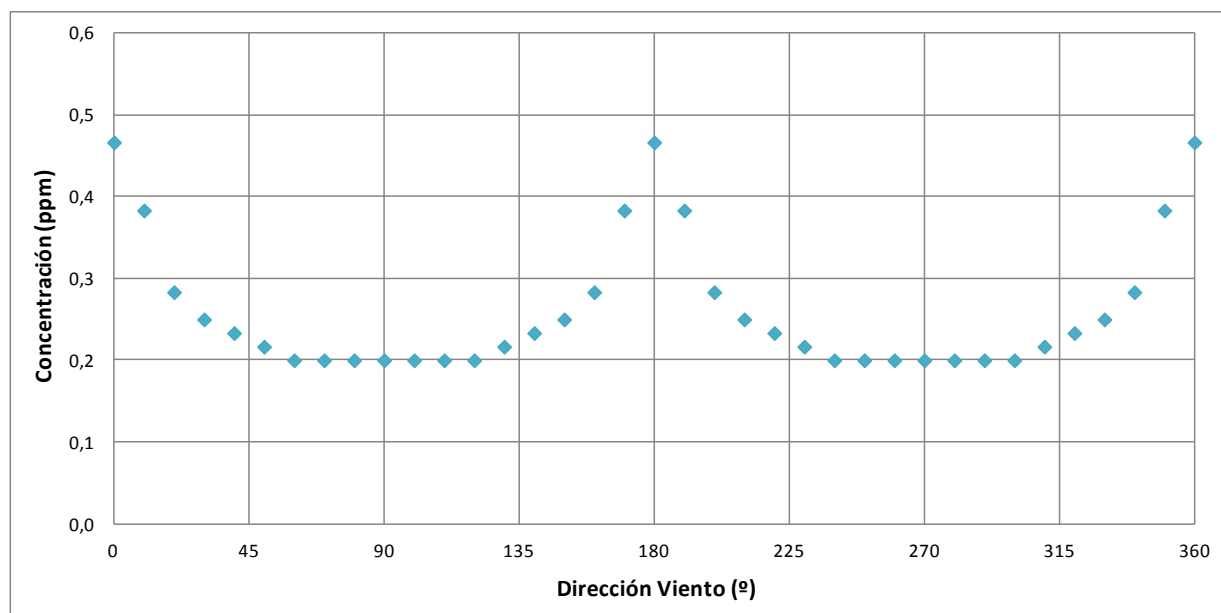
**Figura 5-14: Sistema de coordenadas para la dirección del viento**

En este caso se introducen los distintos valores de dirección del viento, de  $10^\circ$  en  $10^\circ$  y cubriendo el rango completo de valores ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ), manteniendo el resto de parámetros fijos en los valores estándar establecidos al principio.

Los resultados de esta ejecución (tabla 5-3) son coherentes con los obtenidos anteriormente por Sripraparkorn et al (2001) en su estudio. En los casos en los que el viento sopla en dirección paralela a la carretera ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ ) se encuentran picos de concentración ya que todas las emisiones procedentes de los vehículos se mantienen dentro del área de estudio. Por otro lado, cuando la dirección del viento es perpendicular a la carretera ( $90^\circ$  y  $270^\circ$ ), la única concentración detectada por los receptores es la introducida como concentración de fondo.

Además, se puede observar como los valores de concentración suben y bajan de una manera muy pronunciada cuando el valor de la dirección del viento se aproxima o aleja de la paralela a la carretera, respectivamente. Esto nos lleva a la conclusión de que la dirección del viento es un factor crítico en el cálculo de las emisiones contaminantes procedentes del tráfico dentro de un área determinada.

En la figura 5-15 se visualiza perfectamente el comportamiento descrito en los párrafos anteriores.



**Figura 5-15: Concentración de CO en función de la dirección del viento**



DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos			Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm					
Temperature <b>90 F = 32°C</b>			Dirección Viento (°)						
Relative Humidity <b>12%</b>				Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5
Traffic Volume (vph) <b>2750</b>									
Emission Factor = <b>3,906 g/mille</b>			0	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Wind Speed <b>1,7 m/s</b>			10	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
Wind Direction Standard Deviation <b>5º</b>			20	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
Atmospheric Stability Class <b>2</b>			30	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Mixing Height <b>1000 m</b>			40	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Ambient Pollutant Concentration = <b>0,2 ppm</b>			50	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
			60	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			70	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			90	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			100	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			110	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			120	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			130	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
			140	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
			150	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
			160	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
			170	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
			180	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
			190	0,4	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5
			200	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
			210	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
			220	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
			230	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
			240	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			250	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			260	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			270	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			280	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			290	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			300	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
			310	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
			320	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
			330	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
			340	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
			350	0,4	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5
			360	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4

Tabla 5-3: Concentración de CO en función de la dirección del viento

### 5.3.3 Volumen de tráfico

El siguiente parámetro de entrada de interés dentro del análisis de sensibilidad es el volumen de tráfico dentro del tramo de estudio. Lógicamente, a medida que aumente el número de vehículos circulando por la carretera, la concentración de contaminantes se verá también incrementada. Sin embargo, con este análisis se trata fundamentalmente de averiguar en qué medida y de qué forma se produce este incremento.

Al igual que en el apartado anterior, en el que se hizo el estudio para la dirección del viento, se procede ahora del mismo modo pero variando en este caso el valor del volumen de tráfico y manteniendo el resto de parámetros en un valor fijo. Se parte de un número de vehículos contados 'in situ' en la campaña de medidas detallada con anterioridad que asciende a 2750 vehículos/hora. Se establece además un rango comprendido entre 2063 y 4125 veh/h para la realización del estudio. Para delimitar los límites del mencionado rango, se ha supuesto la mitad y el doble de vehículos, respectivamente, en los tres carriles de vuelta del tramo en estudio. Además, se introducen tres valores intermedios para favorecer el estudio de la variación de los resultados dentro del rango establecido.

En la tabla 5-4 se muestran tanto los datos de entrada introducidos en el modelo como los resultados obtenidos para la concentración de CO al ejecutar CALINE4. El valor introducido para el factor de emisión se ha fijado siguiendo la recomendación descrita en la guía de CALINE4. Dicha recomendación establece el uso preferente de condiciones correspondientes al peor escenario real observado en el área de estudio. Por lo tanto, se ha establecido como velocidad de los vehículos 115 km/h, la cual supera el límite de velocidad de la carretera objeto de estudio. Para dicha velocidad se obtuvo un valor para el factor de emisión de 3,906 g/milla.

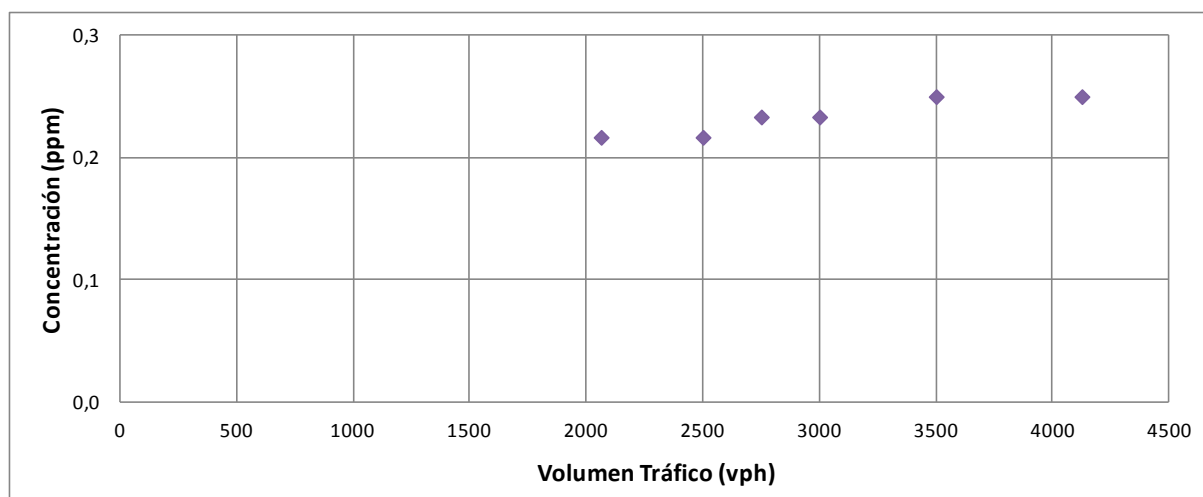
El programa devuelve las concentraciones de CO captadas por cada uno de los receptores establecidos en el escenario de estudio y, a partir de ellas, se calcula una media que ayuda a analizar con mayor facilidad el comportamiento del estudio

llevado a cabo. Los resultados muestran efectivamente un aumento en el valor de la concentración con el incremento del número de vehículos que circulan dentro del área de estudio. Hay que prestar especial atención a los resultados obtenidos para cada uno de los receptores. El hecho de que el viento sople con una dirección de 137° favorece la menor concentración de contaminantes observada en los últimos carriles. Como ya se explicó anteriormente, el modelo de dispersión supone una distribución homogénea del tráfico a lo largo del link.

En la figura 5-16 se expone la gráfica con los resultados obtenidos, en la cual se ve un crecimiento escalonado, lo que expresa una baja sensibilidad del modelo de dispersión para incrementos pequeños (menos de 1000 vehículos por hora) del volumen de tráfico. Es decir, el hecho de añadir más valores dentro del rango establecido no modificaría la gráfica obtenida y por lo tanto no proporcionaría información adicional al análisis.

DATOS		RESULTADOS							
Parámetros fijos	Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature 90 F = 32°C	Volumen Tráfico (vph)	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6	
Relative Humidity 12%									
Wind Direction 137°									
Emission Factor = 3,906 g/mille	2063	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Speed 1,7 m/s	2500	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction Standard Deviation 5°	2750	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Atmospheric Stability Class 2	3000	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mixing Height 1000 m	3500	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm	4125	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2

**Tabla 5-4: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 137°**



**Figura 5-16: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 137°**

Para complementar el estudio de la sensibilidad del modelo al volumen de tráfico, se ha realizado además una modificación en el valor de la dirección del viento con el objetivo de poder comparar el comportamiento de las concentraciones captadas en ambas situaciones. De esta forma, en el primer estudio se utilizó un valor para la dirección del viento de 137° calculado a partir de los datos horarios de la dirección del viento medidos 'in situ', tal y como se indicó en el apartado correspondiente a la introducción de datos en CALINE4. A continuación se realiza un estudio adicional utilizando en este caso un valor de 180°. Esto quiere decir que el viento sopla en dirección paralela a la carretera y por lo tanto, las emisiones contaminantes procedentes del tráfico se mantienen dentro del área de estudio y son detectadas por los receptores establecidos.

Lo esperado es que el comportamiento en este último caso sea semejante al obtenido anteriormente, pero con valores más elevados de concentración por el motivo explicado en el párrafo anterior. En la tabla 5-5 se encuentran los resultados obtenidos para este caso concreto. Además, en la correspondiente gráfica de la figura 5-17 se observa con mayor facilidad el comportamiento de los resultados para la concentración de CO frente a la variación del volumen del tráfico, cuando la dirección del viento es paralela a la carretera.

DATOS		RESULTADOS							
Parámetros fijos	Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature <b>90 F = 32°C</b>	<b>Volumen Tráfico (vph)</b>								
Relative Humidity <b>12%</b>		Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6	
<b>Wind Direction 180º</b>									
Emission Factor = <b>3,906 g/mille</b>	<b>2063</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Wind Speed <b>1,7 m/s</b>	<b>2500</b>	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Wind Direction Standard Deviation <b>5º</b>	<b>2750</b>	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Atmospheric Stability Class <b>2</b>	<b>3000</b>	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Mixing Height <b>1000 m</b>	<b>3500</b>	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Ambient Pollutant Concentration = <b>0,2 ppm</b>	<b>4125</b>	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5

Tabla 5-5: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 180º

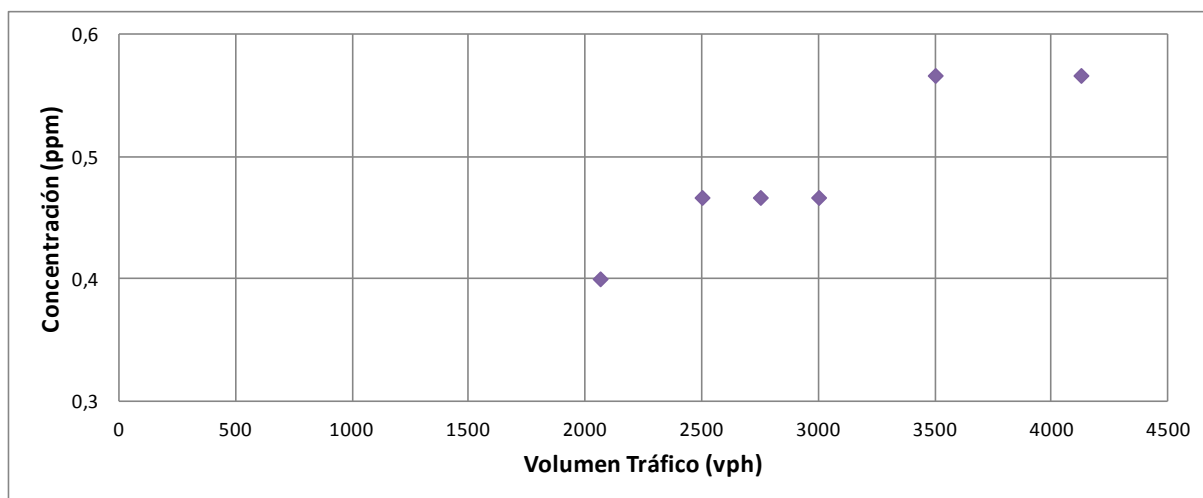


Figura 5-17: Concentración de CO en función del volumen de tráfico para una dirección del viento de 180º



Como se puede observar, los resultados muestran valores más altos de concentración para el mismo número de vehículos y un comportamiento semejante, con un crecimiento escalonado de la concentración debido a la baja sensibilidad del modelo a los pequeños incrementos del volumen de tráfico. La diferencia radica en que cuando la dirección del viento se distancia de la paralela a la carretera, las emisiones son arrastradas hacia fuera del área de estudio y, por tanto, los valores de concentración detectados por los receptores disminuyen. Además, se puede observar muy claramente la diferencia en la distribución de la concentración entre los distintos receptores para ambas direcciones del viento. Mientras la mencionada distribución es simétrica con respecto al centro de la carretera cuando tenemos viento soplando en dirección paralela al link, para el caso con dirección del viento igual a  $137^\circ$ , se observa una distribución asimétrica, captando más concentración los primeros receptores que los últimos (siguiendo el sistema de referencia establecido en el modelo).

Este resultado indica que para direcciones de viento cercanas a la de la vía, la relación entre el número de vehículos y la concentración medida sí permitiría utilizar la metodología de cálculo experimental de emisiones basada en la inversión del modelo de dispersión atmosférica. A su vez, serviría también para validar la metodología basada en el flujo de vehículos y CORINE AIRE.

### **5.3.4 Velocidad del viento**

El siguiente parámetro de entrada seleccionado para el análisis de sensibilidad es la velocidad del viento. En principio esta variable parece realmente influyente en los niveles de concentración que se puedan detectar dentro del área de estudio puesto que una velocidad elevada del viento supondría una mayor mezcla de turbulencia y dispersión y, por tanto, una menor concentración de contaminantes dentro de la carretera. El objetivo ahora es intentar cuantificar esa influencia a través de la ejecución del modelo de dispersión mediante la utilización de distintos valores de velocidad del viento.





En primer lugar se ha decidido hacer un análisis abarcando un amplio rango de velocidades de viento. Como punto de partida, es preciso señalar que en la localización de la carretera no se superan normalmente los 20km/h, pero con objeto de obtener una visión general del análisis de sensibilidad, se realizan primero medidas con valores extremos de velocidad del viento para más tarde centrarse en los valores más usuales dentro de la zona en la que se desarrolla el estudio. Además, y al igual que se hizo para el caso del volumen de tráfico, se realizan dos análisis diferentes para la dirección del viento estándar ( $137^{\circ}$ ) y la paralela a la carretera ( $180^{\circ}$ ), respectivamente.

En la tabla 5-6 se reflejan los resultados obtenidos tras ejecutar el programa con las condiciones indicadas, es decir, todos los parámetros fijos excepto la velocidad del viento y una dirección del viento estándar de  $137^{\circ}$ . Es en este caso cuando se considera un rango de velocidades de viento muy amplio, como primera aproximación. De esta forma, se hacen medidas para velocidades comprendidas entre los 0 y los 32 m/s.

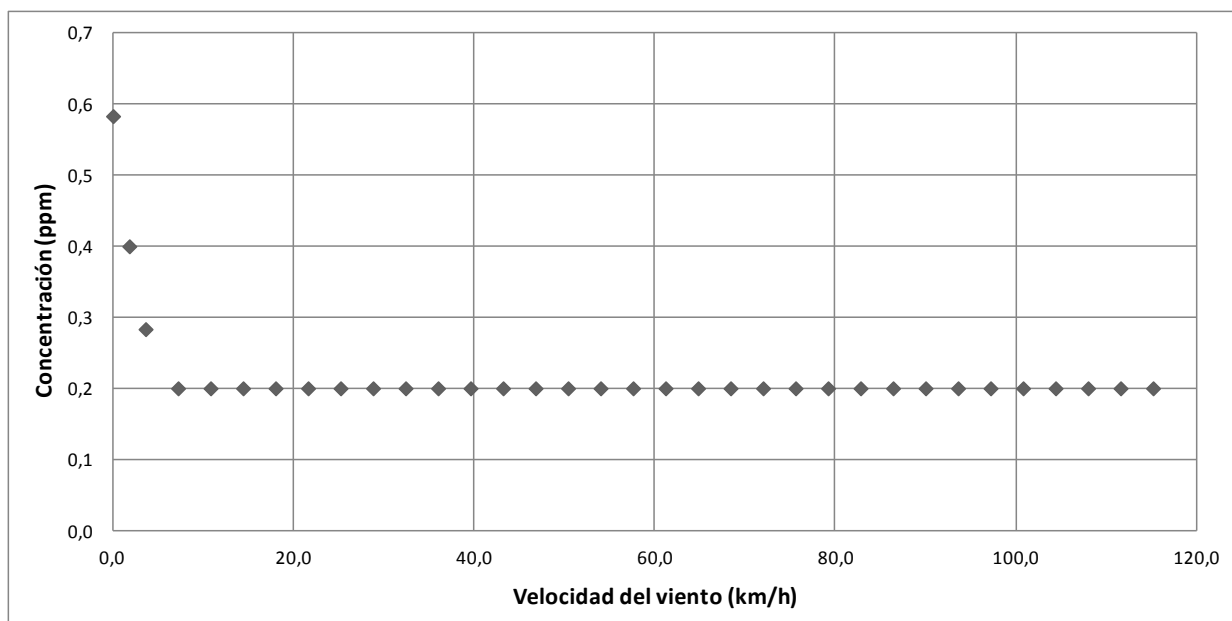
CALINE 4 requiere además que se indique la clase de estabilidad atmosférica (Atmospheric Stability Class) presente en la vía de estudio. Cuando se tiene un rango amplio de velocidades de viento, es preciso modificar este parámetro de modo que se corresponda con las condiciones indicadas en cada caso.

Al igual que en los anteriores apartados, los resultados son representados en una gráfica (figura 5-18) para poder analizar el comportamiento de la concentración de CO en función de la velocidad del viento con mayor claridad. Como era de esperar, a partir de una cierta velocidad, en este caso en torno a 2 m/s (7,2 km/h) la concentración se reduce al valor impuesto como concentración de fondo. Es decir, a partir de esa velocidad la contribución de los vehículos a la concentración que detectan los receptores, tal y como se han definido, sería nula. Por lo tanto, el rango establecido inicialmente era efectivamente muy amplio pero sin embargo ha servido para establecer una acotación correcta que proporcione el rango de velocidades para el cual existen cambios en el nivel de concentración en los receptores.



DATOS				RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable		Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Velocidad Viento	Atmospheric							
Relative Humidity 12%		m/s	Stability Class*	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750		km/h								
Vehicles Speed 71 mph = 114,3 km/h		0,0	A-1	0,6	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
Emission Factor = 3,906 g/mille		0,5	A-1	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
Wind Direction 137º		1,0	A-1	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Wind Direction Standard Deviation 5º		2,0	A-1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mixing Height 1000 m		3,0	B-2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		4,0	B-2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		5,0	B-2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		6,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		7,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		8,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		9,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		10,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		11,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		12,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		13,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		14,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		15,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		16,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		17,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		18,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		19,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		20,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		21,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		22,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		23,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		24,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		25,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		26,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		27,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		28,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		29,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		30,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		31,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		32,0	C-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabla 5-6: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137º



**Figura 5-18: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137°**

El siguiente paso es estudiar con mayor profundidad la variación de concentración para ese rango acotado entre 0 y 2 m/s. El procedimiento es totalmente idéntico al realizado en el paso anterior, con la única diferencia de que los datos de velocidad de viento son introducidos en el modelo con un incremento de tan solo 0,1 m/s, con el fin de obtener una visión más detallada de los resultados. Dichos resultados son reflejados en la tabla 5-7, y representados en la gráfica mostrada en la figura 5-19.

DATOS				RESULTADOS							
Parámetros fijos		Parámetro variable		Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature 90 F = 32°C		Velocidad Viento	Atmospheric								
Relative Humidity 12%		m/s	km/h	Stability Class*	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750											
Vehicles Speed 71 mph = 114,3 km/h		0,0	0,0	A-1	0,6	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
Emission Factor = 3,906 g/mille		0,1	0,4	A-1	0,5	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2
Wind Direction 137º		0,2	0,7	A-1	0,5	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	0,2
Wind Direction Standard Deviation 5º		0,3	1,1	A-1	0,5	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Mixing Height 1000 m		0,4	1,4	A-1	0,4	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		0,5	1,8	A-1	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
		0,6	2,2	A-1	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
		0,7	2,5	A-1	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
		0,8	2,9	A-1	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
		0,9	3,2	A-1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
		1,0	3,6	A-1	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
		1,1	4,0	A-1	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
		1,2	4,3	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
		1,3	4,7	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		1,4	5,0	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		1,5	5,4	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		1,6	5,8	A-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		1,7	6,1	A-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		1,8	6,5	A-1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		1,9	6,8	A-1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		2,0	7,2	A-1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabla 5-7: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137º

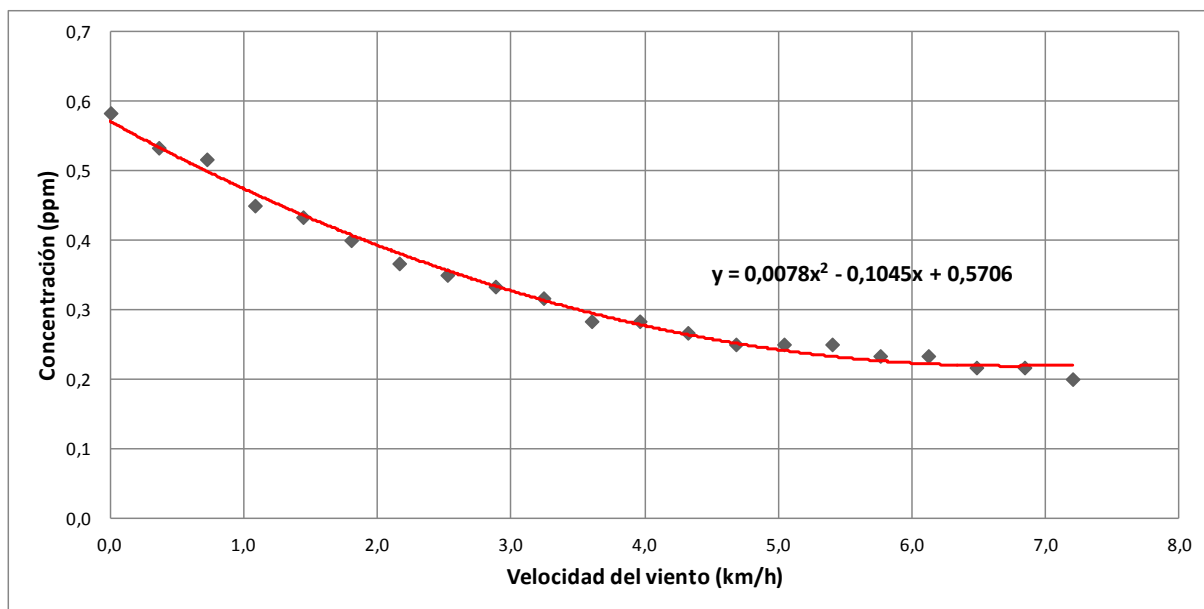


Figura 5-19: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 137º

Como se puede observar en la gráfica, la dependencia de la concentración con la velocidad del viento es cuadrática, habiéndose incluido la ecuación polinómica correspondiente a la tendencia mostrada por la concentración de CO cuando aumenta la velocidad del viento. Si se analiza la pendiente de la curva de tendencia, se observa que para velocidades bajas, por ejemplo 2 km/h, se obtiene un valor de -0,07. Sin embargo, si se calcula nuevamente la pendiente para una velocidad más alta, por ejemplo 6 km/h, el resultado es de -0,01, lo cual indica que la concentración tiende a mantenerse constante a medida que aumenta la velocidad del viento.

Por último, y como ya se mencionó al principio de este apartado, se procede a realizar el mismo estudio para el rango de velocidades acotado y con una dirección del viento de valor 180°. Lo que se espera es un comportamiento semejante con valores de concentración más elevados. El hecho de que el viento sople en dirección paralela a la carretera favorece la mayor concentración de contaminantes en el tramo de estudio.

Los resultados de este último caso se muestran en la tabla 5-8 y están representados en la gráfica de la figura 5-20. Como se puede observar, los resultados muestran una disminución de la concentración de CO con una tendencia curva (ver ecuación en la gráfica), en la que la pendiente se va suavizando según aumenta el valor de la velocidad del viento y con unos valores superiores de concentración para las mismas velocidades de viento, en comparación con el escenario anterior, en el que la dirección del viento era de 137°.

La conclusión de esta parte del estudio es que para calcular experimentalmente las emisiones resulta imprescindible realizar medidas precisas de viento para poder eliminar su influencia en las concentraciones y obtener, a partir de estas, la componente asociada a las emisiones. Por este motivo, la utilización de una estación meteorológica en el punto de medida es obligada, no siendo recomendable utilizar los datos de redes de medida oficiales que estén más alejadas.

DATOS			RESULTADOS							
Parámetros fijos	Parámetro variable		Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature 90 F = 32°C	Velocidad Viento	Atmospheric								
Relative Humidity 12%	m/s	km/h	Stability Class*	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750										
Vehicles Speed 71 mph = 114,3 km/h	0,0	0,0	A-1	2,0	1,7	2,1	2,2	2,2	2,1	1,7
Emission Factor = 3,906 g/mille	0,1	0,4	A-1	1,4	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,3
Wind Direction 180°	0,2	0,7	A-1	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2
Wind Direction Standard Deviation 5°	0,3	1,1	A-1	1,1	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0
Mixing Height 1000 m	0,4	1,4	A-1	1,0	0,9	1,1	1,1	1,1	1,1	0,9
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm	0,5	1,8	A-1	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
	0,6	2,2	A-1	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
	0,7	2,5	A-1	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
	0,8	2,9	A-1	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
	0,9	3,2	A-1	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
	1,0	3,6	A-1	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
	1,1	4,0	A-1	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
	1,2	4,3	A-1	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
	1,3	4,7	A-1	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
	1,4	5,0	A-1	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5
	1,5	5,4	A-1	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
	1,6	5,8	A-1	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
	1,7	6,1	A-1	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
	1,8	6,5	A-1	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
	1,9	6,8	A-1	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4
	2,0	7,2	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabla 5-8: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 180°

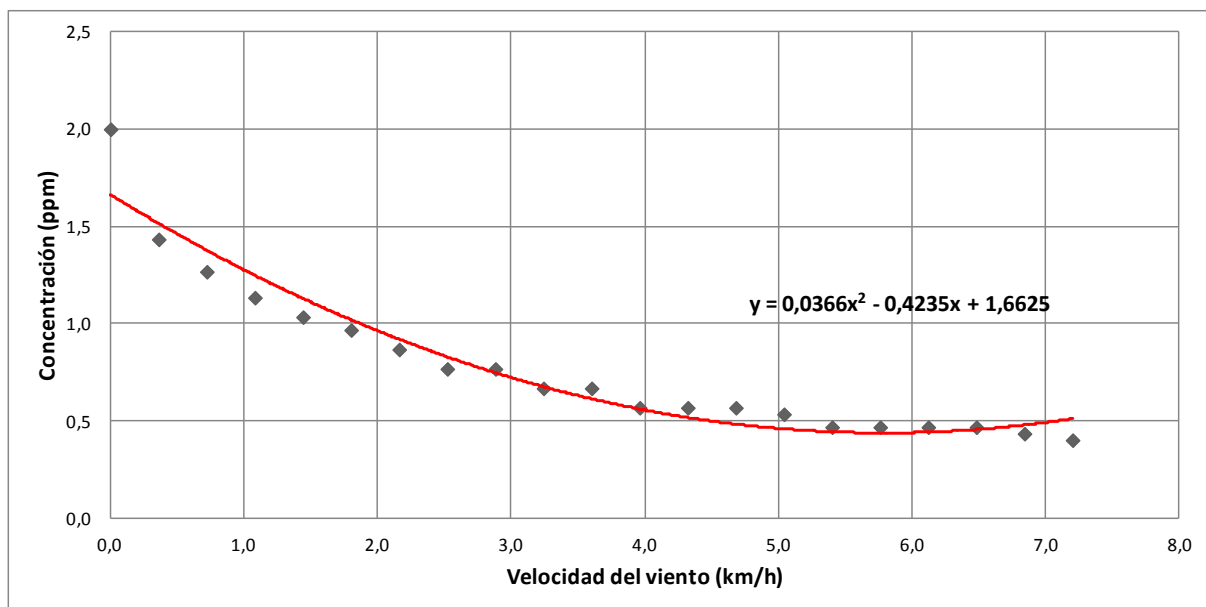


Figura 5-20: Detalle de la concentración de CO en función de la velocidad del viento para una dirección del viento de 180°

### 5.3.5 Longitud del "link"

Tal y como se explicó anteriormente, el link se define como la longitud del tramo de estudio, medido a partir del sistema de referencia que se establece en CALINE4 originalmente. En este caso se ha establecido el origen de coordenadas en el punto medio de la carretera. Por lo tanto, de lo que se trata en este apartado es de modificar la longitud del tramo de estudio de modo que se pueda analizar cómo afecta la mayor distancia de los vehículos a la posición de los receptores en las concentraciones medidas por estos últimos.

Al igual que en apartados anteriores, es interesante realizar un estudio diferenciando entre la dirección del viento medida experimentalmente y la dirección paralela a la carretera, de modo que se pueda establecer una comparación de resultados y una mejor visualización del comportamiento del modelo en ambos casos. Además, se ha creído conveniente modificar la longitud del link en ambos sentidos de la carretera. Es decir, primero se modifica la longitud en el sentido favorable al viento, o aguas abajo, y, a continuación, se estudia el comportamiento de las emisiones cuando modificamos la longitud del link en el sentido opuesto al viento, o aguas arriba. Es de esperar que las concentraciones aumenten según la longitud del link sea mayor en sentido favorable al viento, aunque a partir de la posición de los receptores no se deberían obtener grandes cambios con las direcciones de viento consideradas. Sin embargo, en el caso en el que la longitud del tramo de estudio aumente aguas arriba, dependiendo de la dirección del viento, las concentraciones resultantes podrán verse afectadas o no.

En las tablas 5-9 y 5-10 se muestran los resultados obtenidos para el caso en el que la dirección del viento es de  $137^{\circ}$ . Las gráficas correspondientes (figuras 5-21 y 5-22) representan dichos resultados. Como ya se adelantaba en el párrafo anterior, en el primer caso se observa un aumento de las concentraciones a medida que se incrementa la longitud del link aguas abajo. Una vez que la longitud del tramo de estudio supera el punto en el que se encuentran los receptores (línea negra discontinua en la gráfica), la concentración se estabiliza ya que, lógicamente, las



emisiones de aquellos vehículos que se encuentren situados más allá de la posición de los receptores no afectarán a los resultados con esa dirección del viento. Si por el contrario la longitud del link se incrementa en el sentido opuesto al viento, las emisiones se mantienen constantes ya que al aumentar el tramo de estudio en una zona alejada al punto de medición, y dado que la dirección del viento no es paralela a la carretera, las emisiones producidas allí no serán detectadas por los receptores.

DATOS			RESULTADOS							
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature 90 F = 32°C		Longitud Link (m)								
Relative Humidity 12%			Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6	
Traffic Volume (vph) 2750										
Emission Factor = 3,906 g/mille		50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Speed 1,7 m/s		100	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction 137º		150	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction Standard Deviation 5º		200	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Atmospheric Stability Class 2		250	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Mixing Height 1000 m		300	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		350	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		400	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		500	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		600	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		1000	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		2000	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

**Tabla 5-9: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para una dirección del viento de 137º**





DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Longitud Link (m)							
Relative Humidity 12%			Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750									
Emission Factor = 3,906 g/mille		400	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Speed 1,7 m/s		450	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction 137º		500	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Direction Standard Deviation 5º		550	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Atmospheric Stability Class 2		600	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Mixing Height 1000 m		650	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		700	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		750	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		800	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		900	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		1000	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
		2000	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabla 5-10: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para una dirección del viento de 137º

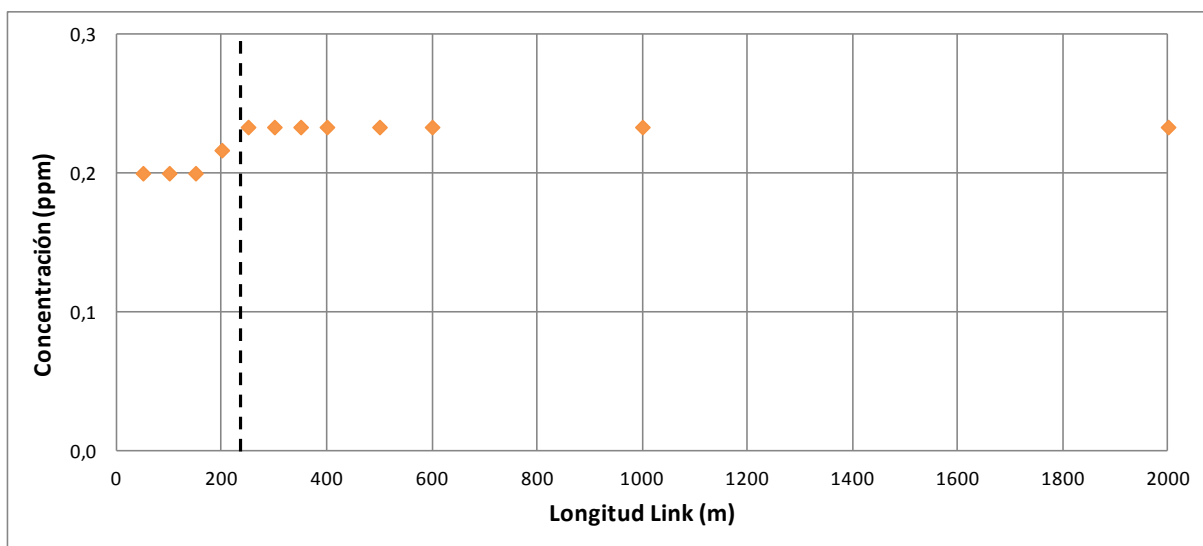
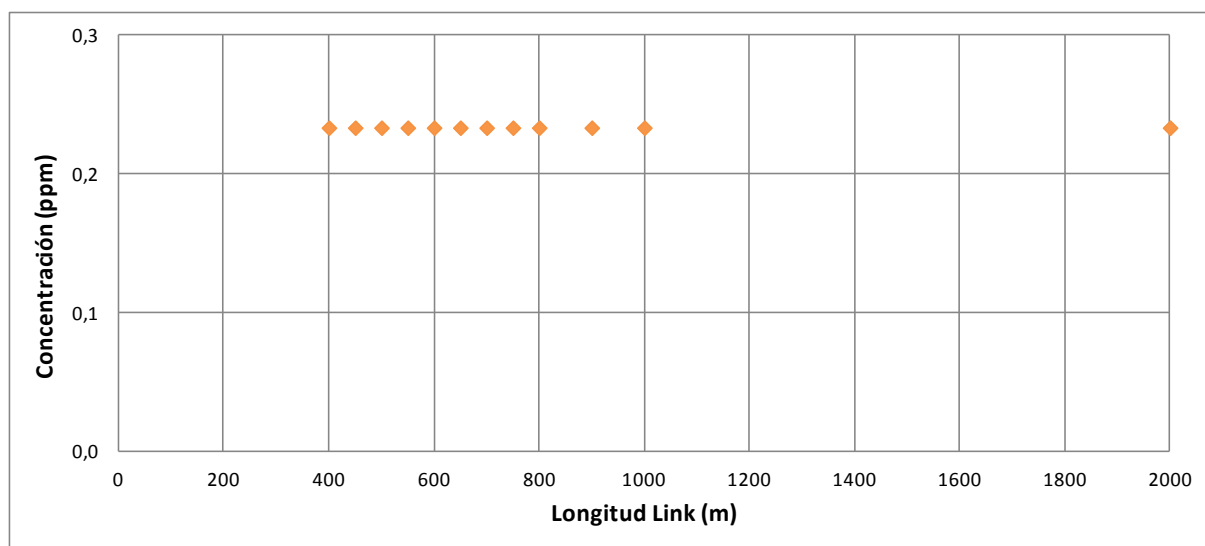


Figura 5-21: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para una dirección del viento de 137º



**Figura 5-22: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 137°**

Si ahora se realiza el mismo estudio estableciendo una dirección del viento paralela a la carretera (180°), se obtienen los resultados reflejados en las tablas 5-11 y 5-12. En la primera de ellas se muestran las diferentes concentraciones obtenidas al variar la longitud del tramo de carretera aguas abajo y, en la segunda, las correspondientes a la variación de la longitud del link en el sentido contrario, es decir, aguas arriba. En este caso, lo que se observa es un comportamiento semejante al obtenido anteriormente, pero con valores más elevados de concentración. Esto es debido a que el hecho de que el viento sople en dirección paralela a la carretera favorece la mayor concentración de contaminantes procedentes del tráfico dentro del área de estudio. En la gráfica de la figura 5-23 se puede ver el comportamiento de la concentración media con respecto a un incremento de la longitud del link aguas abajo mientras que, en la gráfica de la figura 5-24, se observa el correspondiente a las concentraciones obtenidas al variar la longitud del tramo de estudio en sentido contrario. En esta ocasión se observa un aumento de la concentración que se debe a la favorable dirección del viento que se ha establecido.

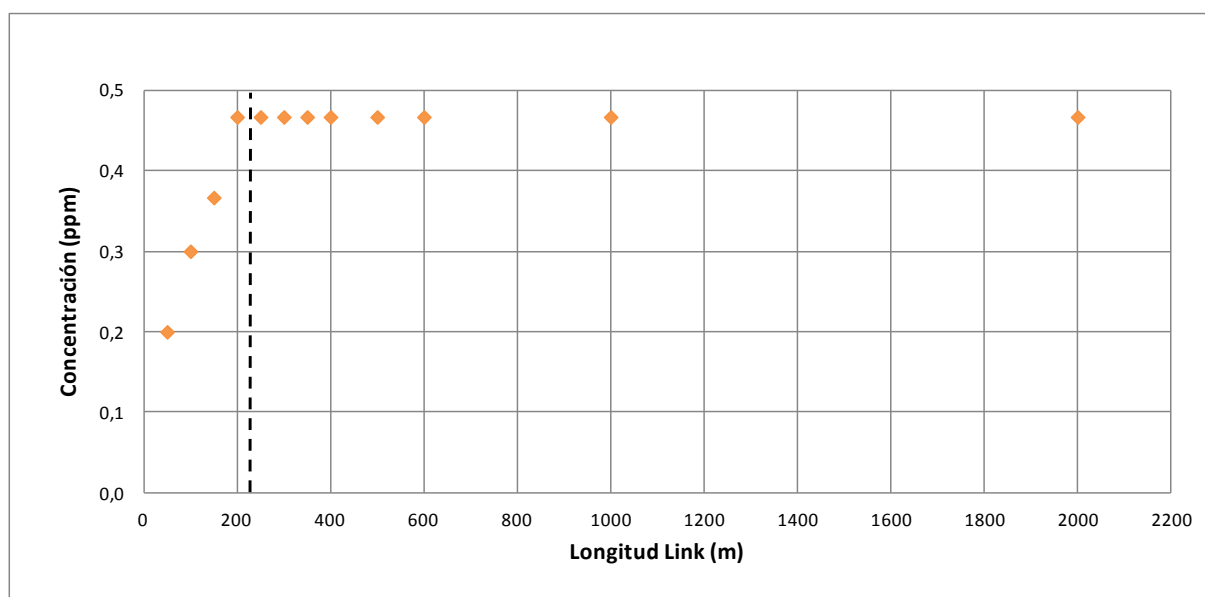


DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Longitud Link (m)							
Relative Humidity 12%			Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750									
Emission Factor = 3,906 g/mille		50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Speed 1,7 m/s		100	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Wind Direction 180º		150	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
Wind Direction Standard Deviation 5º		200	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Atmospheric Stability Class 2		250	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Mixing Height 1000 m		300	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		350	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
		400	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
		500	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
		600	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
		1000	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
		2000	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4

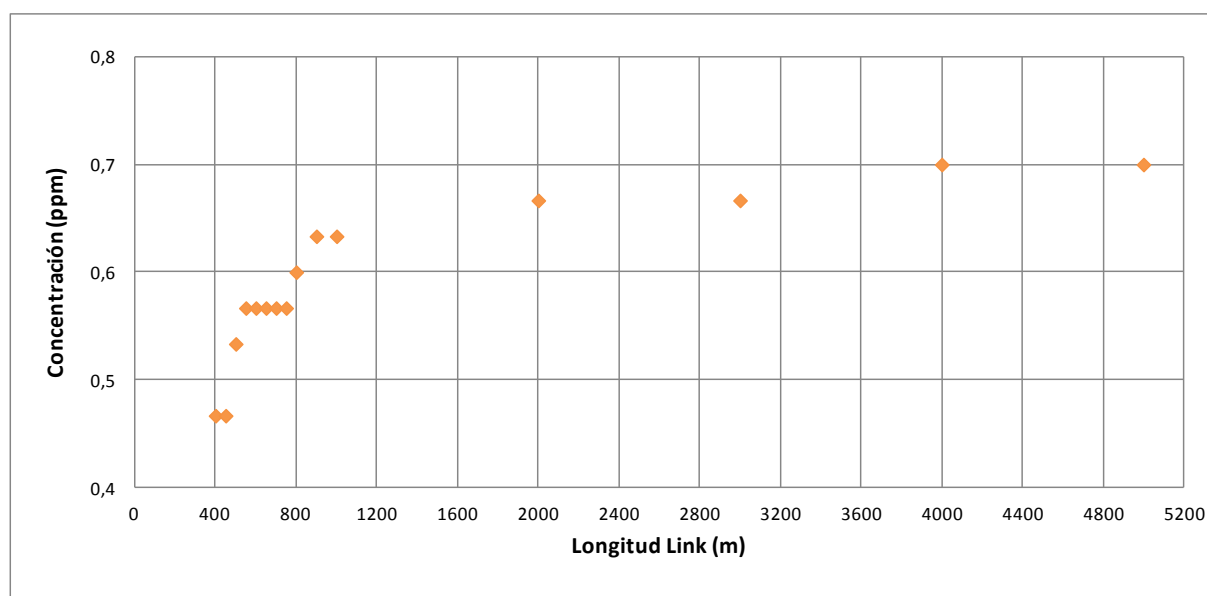
**Tabla 5-11: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para una dirección del viento de 180º**

DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Longitud Link (m)							
Relative Humidity 12%			Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750									
Emission Factor = 3,906 g/mille		400	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Wind Speed 1,7 m/s		450	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Wind Direction 180º		500	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5
Wind Direction Standard Deviation 5º		550	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Atmospheric Stability Class 2		600	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Mixing Height 1000 m		650	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		700	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
		750	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
		800	0,6	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,5
		900	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6
		1000	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6
		2000	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
		3000	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
		4000	0,7	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6
		5000	0,7	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6

**Tabla 5-12: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para una dirección del viento de 180º**



**Figura 5-23: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para una dirección del viento de 180°**



**Figura 5-24: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para una dirección del viento de 180°**



En esta última gráfica se observa un resultado interesante. Como se puede ver, la concentración de CO aumenta a medida que se amplía la zona de estudio pero sólo hasta cierto punto. Es decir, la concentración llega a un máximo a partir de una longitud del link de 4 km aunque, a partir de 1 km, ya se observa un comportamiento prácticamente estable. De esta forma, se cometería un error al acotar la longitud del link en un valor de aproximadamente 1 km que ascendería al 16,7% del valor de la concentración de CO.

Además, el resultado obtenido en este apartado es muy importante porque las emisiones obtenidas a partir de las metodologías propuestas estarán asociadas a un tramo de vía, pero ¿a qué tramo se deben asignar las emisiones calculadas?, de otra forma, ¿qué tramo influye en las concentraciones medidas? De este estudio se deduce que el tramo dependerá del ángulo del viento, por lo que la dirección del viento es un dato fundamental no sólo por se sino porque define la longitud del tramo de vía bajo estudio. En el caso de la configuración concreta que se está estudiando se puede tener una influencia de hasta 4 km para un ángulo de 180°.

### **5.3.6 Influencia de un carril sobre el resto**

En este sexto apartado correspondiente al análisis de sensibilidad se pretende estudiar el efecto de los vehículos que circulan por un determinado carril sobre la concentración de emisiones captadas por los receptores situados a lo largo del tramo de estudio. Este estudio es importante de cara a monitorizar las concentraciones sobre la vía con sensores específicos de CO situados en los mismos módulos de medida del SCT. La inclusión de estos sensores de CO permitiría aumentar significativamente las prestaciones del SCT para que éste no sólo ofrezca información del tráfico sino también de los niveles de inmisión de este gas. De esta forma, el SCT permitiría calcular las emisiones con dos metodologías independientes: a partir del volumen de tráfico y a partir de las concentraciones y la inversión de un modelo de dispersión atmosférica. Por otro lado, si la influencia de un carril sobre otro es despreciable, este sistema ampliado para el CO permitiría la



identificación de vehículos altamente contaminantes, responsables del más del 50% de la contaminación asociada al tráfico.

En este caso se estudiará el efecto del primer carril y del tercero, es decir, el efecto de un carril exterior y un carril central sobre el conjunto de la carretera. Además, para obtener un informe más completo, se ha decidido modificar la velocidad y la dirección del viento de modo que se pueda comprender de una manera más sencilla la variación de la concentración medida por cada receptor.

Como ya se sabe, CALINE4 distribuye uniformemente el volumen de vehículos a lo largo del link establecido. Por la tanto, para poder realizar este estudio, es preciso modificar la posición del link con respecto al centro de la carretera para poder simular el mayor volumen de tráfico en un carril en comparación con el resto. Para ello se sigue utilizando el mismo sistema de coordenadas y se modifica el valor de la coordenada X para situar el link en el primer carril y posteriormente en el tercero. Se ha supuesto un ancho de carril de 3,5 m.

En la tabla 5-13 se muestran los resultados obtenidos tanto para el primer carril como para el tercero, para dos velocidades del viento distintas (1,7 y 5 m/s) y para los valores de dirección del viento utilizados a largo de este análisis, es decir, 137° y 180°. Estos mismos resultados están reflejados en la gráfica de la figura 5-25 para una mejor visualización del comportamiento de la concentración de CO.

Si se analiza el resultado obtenido para el primer carril se observan distintos comportamientos en función del resto de variables tenidas en cuenta en el estudio. Es decir, para una dirección del viento igual a 137°, la concentración captada por los receptores se corresponde al valor de la concentración de fondo, ya que el viento arrastra los contaminantes provenientes de los vehículos fuera del área de estudio. Si por el contrario se establece una dirección del viento paralela a la carretera, las emisiones procedentes de los vehículos se mantendrán dentro del tramo en estudio. Lo que se observa es que la concentración es mayor en el primer carril pero que afecta también a los carriles contiguos, aunque disminuye progresivamente según la



mayor distancia del resto de carriles al primero. La diferencia obtenida variando la velocidad del viento radica básicamente en los valores de la concentración, pero no el comportamiento. Cuanto mayor es la velocidad, menores son las concentraciones registradas por los receptores ya que el viento arrastra las emisiones fuera del área de la carretera con mayor facilidad.

Para el caso en el que los vehículos se concentran exclusivamente en uno de los carriles centrales, el comportamiento obtenido para las concentraciones de monóxido de carbono en el área de estudio se muestra en la figura 5-26. Al igual que para el primer carril, cuando se supone una dirección del viento de  $137^\circ$  no se aprecia ningún tipo de concentración a parte de la ya mencionada concentración de fondo (0,2 ppm). Cuando la dirección del viento es paralela a la carretera, se encuentran unos valores semejantes de concentración para los primeros carriles, que disminuyen ligeramente en los dos últimos. Al estar los coches concentrados en el tramo medio de la carretera, las emisiones son captadas de forma simétrica respecto al tercer carril por los diferentes receptores situados de manera transversal. Concretamente, se ha seleccionado el tercer carril de los seis que existen en total, por lo que es razonable que en los últimos dos carriles se observe un valor ligeramente inferior de la concentración.

Por último, es necesario mencionar que los resultados obtenidos variando la velocidad del viento se asemejan a los obtenidos en el caso anterior, resultando valores menores de concentración para mayores velocidades del viento, por los motivos ya establecidos.

		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm								
		Dirección Viento (º)									
			Media 6 Receptores			Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Wind Speed = 1,7 m/s	Primer Carril	137		0,2		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		180		0,4		0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2
Wind Speed = 5 m/s	Primer Carril	137		0,2		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		180		0,3		0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Wind Speed = 1,7 m/s	Tercer Carril	137		0,2		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		180		0,5		0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
Wind Speed = 5 m/s	Tercer Carril	137		0,2		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		180		0,3		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2

Tabla 5-13: Concentración de CO en función del carril utilizado en el estudio

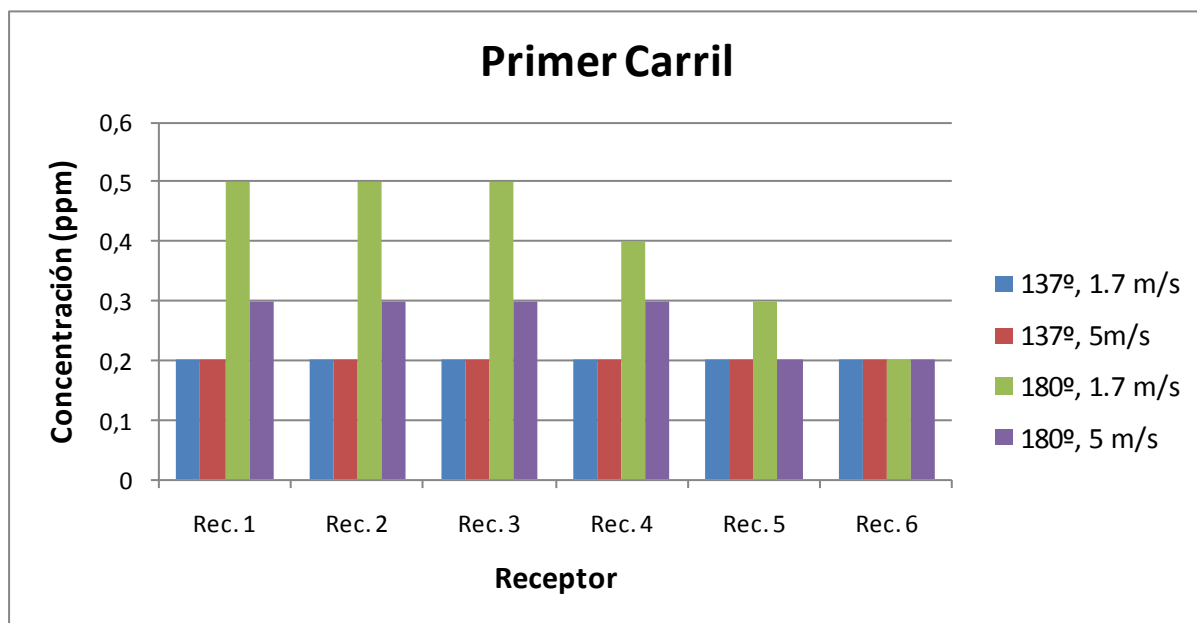
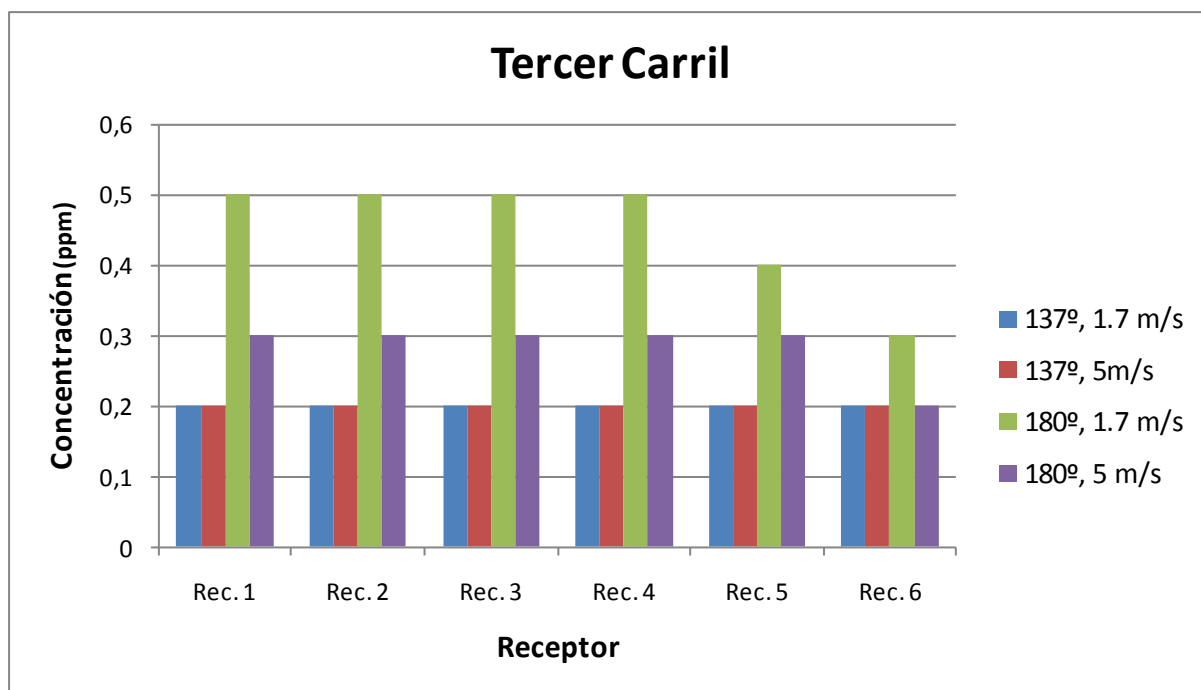


Figura 5-25: Concentración de CO en función del primer carril





**Figura 5-26: Concentración de CO en función del tercer carril**

La conclusión de este estudio es que el hecho de añadir un sensor de CO a los módulos SCT permitiría de forma sencilla y con un bajo coste medir concentraciones sobre la vía e incluso calcular las emisiones, datos de gran interés medioambiental y para la gestión eficiente del tráfico. Sin embargo, la detección de vehículos altamente contaminantes no sería tan sencilla ya que la contaminación producida en un carril afecta a los carriles aledaños, no pudiéndose asociar unívocamente una concentración alta en un carril a las emisiones anómalas del vehículo que ha pasado por ese carril.

### 5.3.7 Factor de emisión

Otro de los parámetros de entrada del modelo de dispersión es el factor de emisión, el cual se ha calculado mediante el programa EMFAC2007. A la hora de calcularlo, tal y como se vio en el apartado 4.3.3, se utilizó como región de estudio la ciudad de Sacramento por su mayor similitud, en términos de variables meteorológicas, a la ciudad de Madrid.



El programa EMFAC2007 no permite modificar la información asociada a las diferentes áreas geográficas (en este caso, la ciudad de Sacramento), a excepción del número de vehículos de cada tipología. Por lo tanto, en este apartado se pretende analizar el impacto de la modificación de la composición del parque automovilístico en el cálculo del factor de emisión.

A tal efecto, se han propuesto varios casos con un diferente reparto de los vehículos entre el conjunto de las tipologías establecidas (ver nuevamente el apartado 5.2.1). Dentro de estos casos cabe destacar aquél cuyos datos están basados en las estadísticas oficiales del parque automovilístico de la Comunidad de Madrid ofrecidas por la Dirección General de Tráfico (DGT) en el año 2009 (Web [11]). Dichas estadísticas se encuentran reflejadas en el Anexo I.

Además, este estudio es útil para cuantificar el error cometido en las campañas de medidas previas realizadas en el escenario de estudio. En estos casos, tal y como se introdujo en el apartado 5.1.1.1, la clasificación de los vehículos que circulaban por la carretera se realizó mediante un SCT basado en un sensor de distancias por ultrasonidos MaxSonar EZ-1. Este sensor detecta el paso de un vehículo al producirse una disminución en el tiempo de retorno de la señal emitida hacia el suelo, como consecuencia de la disminución de la distancia recorrida por la señal al encontrarse con el vehículo. El sistema completo estaba formado por 6 sensores, uno para cada carril, conectados a un ordenador encargado de procesar la señal y dar el número de vehículos, su clase (por tamaños) y su rango de velocidad (Gali, 2008). Como es razonable, este sistema puede cometer errores en la diferenciación de, por ejemplo, turismos y vehículos de carga ligeros, vehículos de carga ligeros y pesados o vehículos de carga pesados y autobuses. Se ha supuesto un error del 10% para cada uno de los casos descritos anteriormente.

Los resultados del estudio, después de realizar la ejecución de EMFAC2007 para cada uno de los casos propuestos, se reflejan en la tabla 5-14. En dicha tabla se muestran en primer lugar los datos originales ofrecidos por el programa para la

ciudad de Sacramento. A continuación, se detallan los porcentajes definidos para cada tipo de vehículo según el caso y el porcentaje de variación con respecto al caso original. Finalmente (en verde), se muestran los valores del factor de emisión según el caso y su respectiva tasa de variación porcentual con respecto al factor de emisión obtenido con los datos originales.

	Turismos	Vehículos de Carga Ligeros	Vehículos de Carga Pesados	Otros Autobuses	Autobuses Urbanos	Motocicletas	Factor de emisión (g/milla)	Desviación (%)
<b>Datos Originales</b>	<b>58,20%</b>	<b>25,88%</b>	<b>11,68%</b>	<b>0,13%</b>	<b>0,04%</b>	<b>4,07%</b>	<b>3,906</b>	<b>-</b>
<b>Caso 1</b>	48,20%	35,88%	11,68%	0,13%	0,04%	4,07%	3,941	0,90%
<b>% Variación</b>	(-10%)	(+10%)						
<b>Caso 2</b>	58,20%	15,88%	21,68%	0,13%	0,04%	4,07%	3,910	0,10%
<b>% Variación</b>		(-10%)	(+10%)					
<b>Caso 3</b>	58,20%	25,88%	1,68%	5,13%	5,04%	4,07%	4,413	12,98%
<b>% Variación</b>			(-10%)	(+5%)	(+5%)			
<b>Caso 4</b>	76,33%	14,99%	2,17%	0,20%	0,07%	6,24%	4,847	24,09%
<b>% Variación</b>	(+18,13%)	(-10,89%)	(-9,51%)	(+0,07%)	(-0,03%)	(+2,17%)		

**Tabla 5-14: Análisis de sensibilidad del factor de emisión en función de la caracterización del tráfico.**

Tal y como se puede observar, un 10% de error en la caracterización de los turismos a favor de los vehículos de carga ligeros no supone apenas variación en el valor obtenido para el factor de emisión (inferior al 1%). Aún menos variación supone el mismo 10% de error pero ahora entre los vehículos de carga ligeros y pesados. Dicho error se traduce en tan solo un 0,1% de desviación en el valor del factor de emisión. Más preocupante parece el caso 3, en el que se comete un error del 10% en la caracterización de los vehículos de carga pesados a favor de los autobuses (se ha supuesto un 5% más de autobuses urbanos y un 5% más de otros autobuses). En este caso se tiene una desviación del factor de emisión de casi un 13%.

El caso 4 expresa la caracterización del tráfico en función de los porcentajes ofrecidos por la DGT para el parque automovilístico de la Comunidad de Madrid. La diferencia con los datos ofrecidos por EMFAC2007 para la ciudad de Sacramento son considerables y de ahí, que se obtenga una desviación en el factor de emisión



del conjunto de los vehículos de un 24%, aproximadamente. Esto supone que es de verdadera importancia ajustar la modelización realizada al área específica en la que se realice el estudio. Y esto debe hacerse no solo en lo referente a los parámetros meteorológicos, sino también en la caracterización del parque automovilístico.

Finalmente, y a la vista de estos resultados, se podría concluir diciendo que el SCT utilizado es aceptable ya que los posibles errores cometidos en la clasificación de los vehículos (en torno al 10%) no afectan en gran medida al factor de emisión del conjunto de ellos. Por otro lado, una mayor precisión en la diferenciación entre vehículos de carga pesados y autobuses sería necesaria, puesto que tal y como se ha visto, un error en este caso tiene un mayor peso en el valor del factor de emisión.



## **6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE DISPERSIÓN A LOS PARÁMETROS DE ENTRADA (II)**

A la vista de los resultados obtenidos en el primer análisis de sensibilidad realizado, se puede observar que los parámetros para los cuales el modelo resulta ser más sensible son la dirección y velocidad del viento y la longitud del link, o lo que es lo mismo, el tramo de carretera que se tiene en cuenta para hacer el estudio.

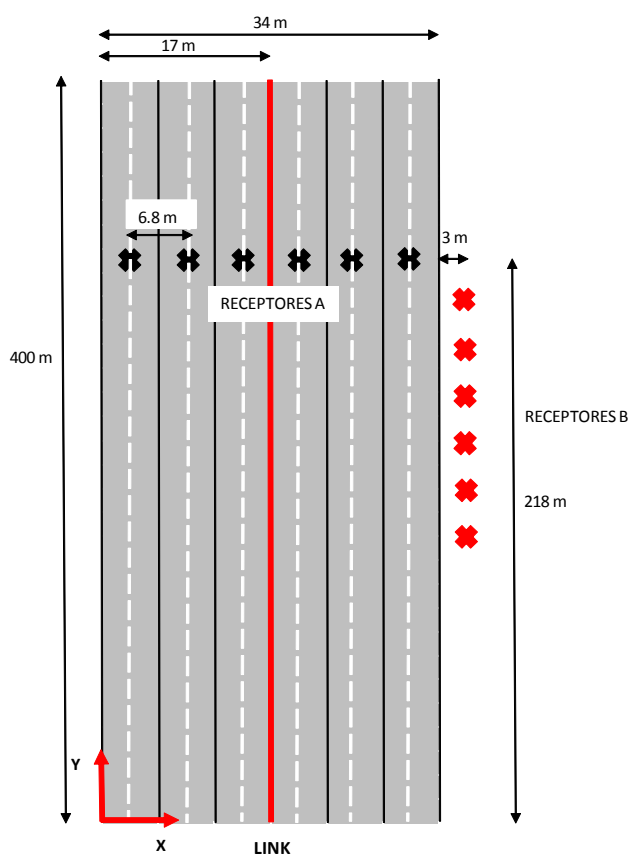
Estos resultados tienen fuertes implicaciones en la aplicabilidad de los métodos del cálculo experimental de emisiones. Como se ha visto en el capítulo anterior, sólo para ángulos cercanos a 180° y velocidades de viento menores de 3 km/h aproximadamente, el modelo de dispersión atmosférica sería aplicable con garantías en esa configuración.

Para subsanar estas deficiencias, se pensó que probando una nueva distribución de los receptores o añadiendo nuevos receptores en el modelo se podrían obtener mejores resultados, compensando la sensibilidad del modelo a los parámetros indicados en el primer párrafo. Por ello, y dada la geometría que presenta la carretera objeto de estudio, se decidió colocar 6 nuevos receptores en uno de los márgenes de la carretera, en el límite de lo que se ha denominado zona de mezcla. De esta forma se espera reducir la sensibilidad del modelo, obteniendo valores más homogéneos para la concentración de CO. En la figura 6-1 se muestra una representación de la nueva distribución de los receptores en la carretera.

A modo de aclaración, es importante mencionar que para diferenciar correctamente los dos grupos de receptores, a los 6 que ya se tenían previamente definidos y ubicados sobre la pasarela de la carretera se les ha llamado "Receptores A", mientras que a los nuevos 6 receptores se les pasa a llamar "Receptores B".

A la hora de definir la ubicación de los nuevos receptores en CALINE4, tal y como se vio en el apartado 4.3.2.2, se deben introducir las coordenadas X, Y y Z para cada uno de ellos. Su ubicación con respecto a los ejes X e Y se puede observar de forma clara en la figura 6-1, existiendo una distancia entre ellos de 6,8 m para ser consistentes y mantener la geometría establecida en los Receptores A. El problema surge en la elección de la altura de estos nuevos receptores. En este caso no se tiene ningún soporte fijo tal y como ocurriría con los receptores de la configuración original, ubicados sobre la pasarela que cruza la carretera, por lo que se podrían disponer a diferentes alturas. En lugar de elegir una altura determinada, se pensó que podría ser más interesante realizar un análisis de sensibilidad del modelo para este parámetro de entrada.

Por lo tanto, antes de analizar el comportamiento del sistema ante la variación de la dirección del viento, la velocidad del viento y la longitud del link, se procede a realizar el mencionado análisis de sensibilidad para la altura de los Receptores B.



**Figura 6-1: Esquema de la disposición del link y los receptores en el nuevo escenario de estudio**



## 6.1 Altura de los receptores

Tal y como se ha introducido previamente, el primer parámetro de entrada objeto de este nuevo análisis de sensibilidad es la altura de los Receptores B. Simplemente se trata de ir variando dicho parámetro mientras el resto se mantienen fijos en un valor constante.

Con respecto a los valores establecidos en este caso para la velocidad y la dirección del viento, se ha elegido el dato que se consideraba como estándar en el primer análisis de sensibilidad para la velocidad del viento, es decir, 1,7 m/s, mientras que para la dirección del viento se ha elegido el valor de 180°. Anteriormente se había definido una dirección del viento experimental de 137°, pero en este caso, y dado el sistema de coordenadas a partir del cual se refiere la dirección del viento (ver apartado 5.3.2), éste soplaría desde la posición en la que se encuentran los Receptores B, lo cual no ayudaría a la obtención de unos buenos resultados.

Por último, es importante mencionar que se ha establecido un rango de variación de la altura entre 0,5 y 20 m. Obviamente el límite superior supone una altura excesivamente elevada para la ubicación de los Receptores B, pero lo que se pretende con ese valor es comprobar hasta que altura un receptor es capaz de captar concentración de contaminantes procedente del tráfico según el modelo de dispersión atmosférica.

En la tabla 6-1 se muestran los resultados obtenidos tras las diversas ejecuciones del modelo CALINE4. Dichos resultados son representados en la gráfica de la figura 6-2 para una mejor comprensión de la sensibilidad del modelo a la altura de los Receptores B.

DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Altura Receptor (m)	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Relative Humidity 12%			B						
Traffic Volume (vph) 2750									
Emission Factor = 3,906 g/mille		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Wind Speed 1,7 m/s		1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Wind Direction 180º		1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Wind Direction Standard Deviation 5º		2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
Atmospheric Stability Class 2		2,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Mixing Height 1000 m		3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		3,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		4,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		5,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
		6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		9	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		10	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		15	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
		20	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabla 6-1: Concentración de CO en función de la altura de los Receptores B

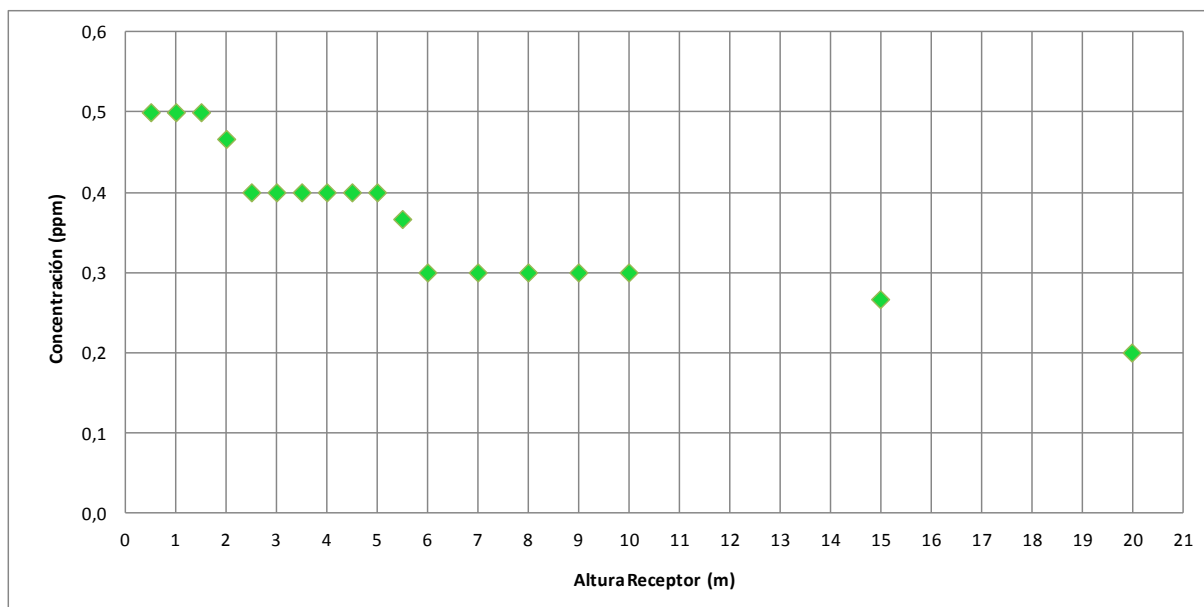


Figura 6-2: Concentración de CO en función de la altura de los Receptores B





Tal y como se puede observar en la gráfica representada, los receptores captan una mayor concentración de CO cuando se ubican a una altura de entre 0,5 m y 1,5 m sobre el nivel de la carretera. A partir de 1,5 m el valor de la concentración disminuye y, según los resultados obtenidos, los receptores detectan la concentración de CO procedente del tráfico hasta una altura de 20 m, a partir de la cual sólo se encuentra la concentración de fondo.

El resultado obtenido en este análisis es muy interesante y será de ayuda para la realización de los siguientes estudios centrados en otros parámetros de entrada. Concretamente, a partir de ahora se establece la posición de los receptores en una altura fija de **1 m**, para así obtener los mejores resultados posibles.

## 6.2 Dirección del viento

Al igual que en el primer análisis de sensibilidad, se procede ahora a modificar el valor de la dirección del viento manteniendo el resto de valores constante. El sistema de coordenadas utilizado ya se definió en el caso anterior (ver figura 5-14).

Se han realizado ejecuciones del modelo para cada uno de los ángulos considerados. En total son 36 ángulos que se corresponden con el rango completo de valores, de 0° a 360°, utilizando incrementos de 10°. Según la configuración establecida en este nuevo análisis (ver figura 6-1), lo esperado es que el conjunto compuesto por los Receptores A y los Receptores B amplíen el abanico de situaciones en las que el modelo de dispersión atmosférica sea aplicable al cálculo experimental de emisiones. Especialmente se espera que ocurra esto en el rango de valores de dirección del viento comprendido entre 180° y 360°, puesto que en ese caso el viento soplará hacia los nuevos receptores incluidos en el modelo.

Los resultados de este estudio se muestran en la tabla 6-2. En concreto, se muestran los resultados obtenidos para los Receptores B, puesto que los

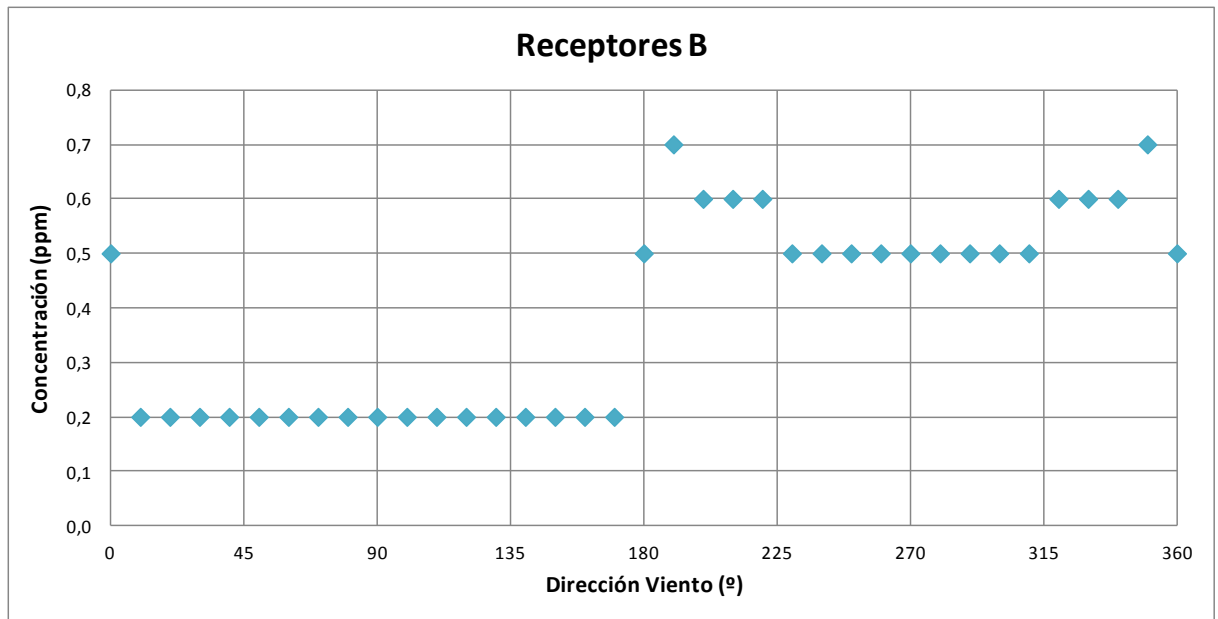


correspondientes a los Receptores A ya fueron explicados en el análisis de sensibilidad previo.

Con el fin de favorecer un mejor análisis de los resultados obtenidos, en la gráfica de la figura 6-3 se visualiza el comportamiento de las concentraciones ofrecidas por los Receptores B.

DATOS		RESULTADOS							
Parámetros fijos	Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature 90 F = 32°C	Dirección Viento (°)	Media 6 Receptores	Rec. 7	Rec. 8	Rec. 9	Rec. 10	Rec. 11	Rec. 12	
Relative Humidity 12%		B							
Traffic Volume (vph) 2750									
Emission Factor = 3,906 g/mille	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Wind Speed 1,7 m/s	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Wind Direction Standard Deviation 5°	20	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Atmospheric Stability Class 2	30	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Mixing Height 1000 m	40	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm	50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Receptors B Height 1 m	60	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	70	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	80	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	90	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	100	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	110	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	120	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	130	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	140	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	150	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	160	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	170	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
	180	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	190	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
	200	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	210	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	220	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	230	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	240	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	250	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	260	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	270	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	280	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	290	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	300	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	310	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	320	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	330	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	340	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
	350	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
	360	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

Tabla 6-2: Concentración de CO en función de la dirección del viento para los Receptores B



**Figura 6-3: Concentración de CO en función de la dirección del viento para los Receptores B**

Tal y como se preveía, dentro del rango  $180^{\circ}$  -  $360^{\circ}$  se observa una mayor concentración de CO en los Receptores B, obteniéndose picos de concentración cuando el viento sopla con una dirección cercana a la paralela de la carretera ( $190^{\circ}$  y  $350^{\circ}$ ).

Comparando las gráficas 6-3 y 5-15 se puede apreciar que con la configuración B las concentraciones que se obtienen son más altas y además lo son para el rango de direcciones de viento entre  $180$  y  $360^{\circ}$ . Dado que los factores de emisión y todos los parámetros meteorológicos son iguales en los dos estudios, se puede decir que la configuración B es mejor opción ya que presenta una aplicabilidad más amplia.

Además, centrando los resultados en el rango  $180^{\circ}$  -  $360^{\circ}$ , con esta nueva disposición de los receptores se alcanza una menor sensibilidad del modelo a la dirección del viento, obteniendo unos valores de concentración de CO más uniformes independientemente de la dirección en la que sopla el viento. Sin



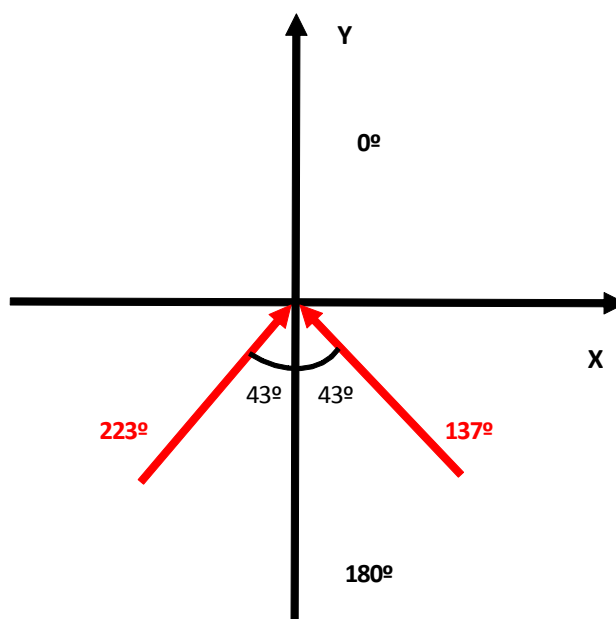
embargo, se sigue obteniendo un valor máximo de concentración cuando el viento sopla en dirección paralela a la carretera.

La configuración óptima serían dos sistemas de receptores situados paralelamente a la carretera para cubrir todos los ángulos de viento y aprovechar todas las ventajas de la configuración B.

## 6.3 Velocidad del viento

El siguiente parámetro de entrada analizado es la velocidad del viento. Como ya se vio en el primer análisis de sensibilidad, una mayor velocidad del viento favorecería concentraciones más bajas de contaminantes dentro del escenario de estudio. Aunque se espera que en la nueva disposición de los receptores el comportamiento del modelo con la velocidad de viento no cambie drásticamente, es necesario evaluar el impacto de este parámetro en la nueva configuración.

Se ha decidido hacer dos estudios distintos según el valor de la dirección del viento. Esto ya se hizo en el primer análisis de sensibilidad para una dirección del viento experimental de  $137^\circ$  y otra paralela a la carretera ( $180^\circ$ ), respectivamente. En este caso se va a modificar ese valor de la dirección del viento establecida como estándar, ya que  $137^\circ$  supone que el viento sopla desde la posición de los receptores y, por lo tanto, éstos no captarían los contaminantes procedentes del tráfico. Por ello, se ha establecido para este caso, y teniendo en cuenta siempre el sistema de referencia para los valores de dirección del viento definido anteriormente, un valor estándar de  $223^\circ$  que supone un viento soplando hacia la posición de los receptores. Este valor supone la misma distancia en grados hasta la dirección paralela a la carretera, según se indica de forma gráfica en la figura 6-4. Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, el valor de  $180^\circ$  se escoge por ser la situación en la que se obtienen valores máximos para la concentración de contaminantes.



**Figura 6-4: Esquema de la dirección del viento establecida en este apartado (223°) con respecto a la anterior (137°)**

El rango de valores establecido para la velocidad del viento va desde 0 m/s hasta 4 m/s. Se han tomado valores de velocidad con un incremento de 0,1 m/s hasta llegar a los 2 m/s y, además, se añaden dos ejecuciones adicionales del modelo para 3 m/s y 4 m/s, respectivamente. Esto se ha hecho con el objetivo de obtener una información más completa del comportamiento del modelo para valores más altos de la velocidad, ya que dada la nueva configuración de los receptores y con una dirección del viento de 223°, los valores de concentración esperados son más elevados.

En la tabla 6-3 se reflejan los resultados obtenidos para los Receptores B tras ejecutar el programa con las condiciones indicadas y una dirección del viento estándar de 223°. En la tabla se muestran los diferentes valores utilizados para la velocidad del viento en m/s y su equivalencia en km/h. La gráfica correspondiente (figura 6-5), refleja la evolución de la concentración captada por los Receptores B con la variación de la velocidad del viento, en km/h.

DATOS				RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable		Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature <b>90 F = 32°C</b>		Velocidad Viento	Atmospheric Stability Class*							
Relative Humidity <b>12%</b>										
Traffic Volume (vph) <b>2750</b>		m/s	km/h	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Vehicles Speed <b>71 mph = 114,3 km/h</b>				B						
Emission Factor = <b>3,906 g/mille</b>		0,0	0,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		0,1	0,4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Wind Direction <b>223º</b>		0,2	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Wind Direction Standard Deviation <b>5º</b>		0,3	1,1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Mixing Height <b>1000 m</b>		0,4	1,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Ambient Pollutant Concentration = <b>0,2 ppm</b>		0,5	1,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Receptors B Height <b>1 m</b>		0,6	2,2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
		0,7	2,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
		0,8	2,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
		0,9	3,2	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
		1,0	3,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,1	4,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,2	4,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,3	4,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,4	5,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,5	5,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,6	5,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,7	6,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1,8	6,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		1,9	6,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		2,0	7,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		3,0	10,8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		4,0	14,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabla 6-3: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 223º)

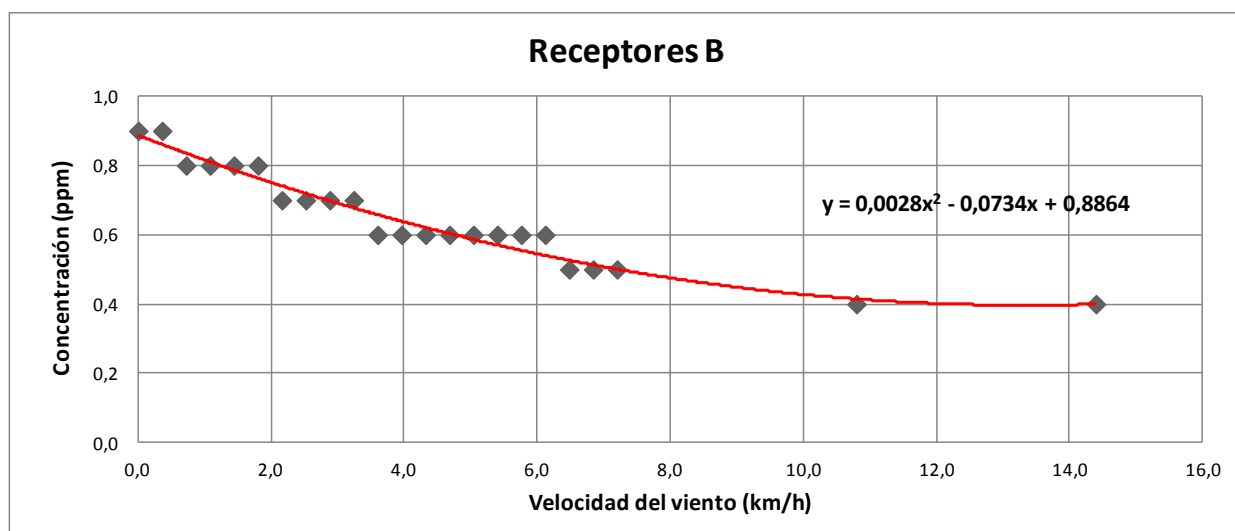


Figura 6-5: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 223º)



El comportamiento observado sigue los patrones obtenidos en el análisis de sensibilidad de la configuración A, donde sólo se consideraron los receptores ubicados sobre la pasarela. Esto quiere decir que la concentración de CO procedente de los vehículos disminuye dentro del área de estudio según el viento sopla con mayor intensidad. En aquel análisis se vio que, para una dirección del viento de  $137^{\circ}$ , la concentración del tráfico dejaba de verse reflejada en los resultados obtenidos a partir de una velocidad de 2 m/s (7,2 km/h) (ver tabla 5-7 y figura 5-19). En este caso, para una dirección del viento de  $223^{\circ}$ , se observa que se siguen captando las emisiones del tráfico aún teniendo una velocidad del viento que supera en un 100% a la del caso anterior (es decir, 4 m/s o su equivalente 14,4 km/h).

El mismo estudio se realizó considerando una dirección del viento paralela a la carretera ( $180^{\circ}$ ). En la tabla 6-4 se muestran los resultados obtenidos para los Receptores B. Adicionalmente, la gráfica de la figura 6-6 muestra la variación de la concentración con la velocidad del viento para los nuevos receptores.

Si se comparan las figuras 6-5 y 6-6 se puede ver que el nivel de concentración máxima es similar, aunque para  $223^{\circ}$  el ritmo de decrecimiento de la concentración con la velocidad del viento es menor que para  $180^{\circ}$ , llegando a estabilizarse a una concentración mayor.

Comparando con la configuración A (figura 5-20) se puede apreciar que las concentraciones que se obtienen para  $180^{\circ}$  en la configuración B son menores que en la A. Este resultado es lógico ya que en la configuración A el viento arrastra los contaminantes de la vía hacia los receptores y en la configuración B los contaminantes son arrastrados paralelamente a la línea de los receptores.

DATOS				RESULTADOS							
Parámetros fijos		Parámetro variable		Concentraciones CO (CALINE4), ppm							
Temperature 90 F = 32°C		Velocidad Viento	Atmospheric								
Relative Humidity 12%		m/s	km/h	Stability Class*	Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) 2750					B						
Vehicles Speed 71 mph = 114,3 km/h		0,0	0,0	A-1	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
Emission Factor = 3,906 g/mille		0,1	0,4	A-1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
Wind Direction 180°		0,2	0,7	A-1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
Wind Direction Standard Deviation 5°		0,3	1,1	A-1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Mixing Height 1000 m		0,4	1,4	A-1	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		0,5	1,8	A-1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Receptors B Height 1 m		0,6	2,2	A-1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
		0,7	2,5	A-1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		0,8	2,9	A-1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		0,9	3,2	A-1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
		1,0	3,6	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		1,1	4,0	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		1,2	4,3	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		1,3	4,7	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		1,4	5,0	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		1,5	5,4	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		1,6	5,8	A-1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
		1,7	6,1	A-1	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		1,8	6,5	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		1,9	6,8	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		2,0	7,2	A-1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Tabla 6-4: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 180°)

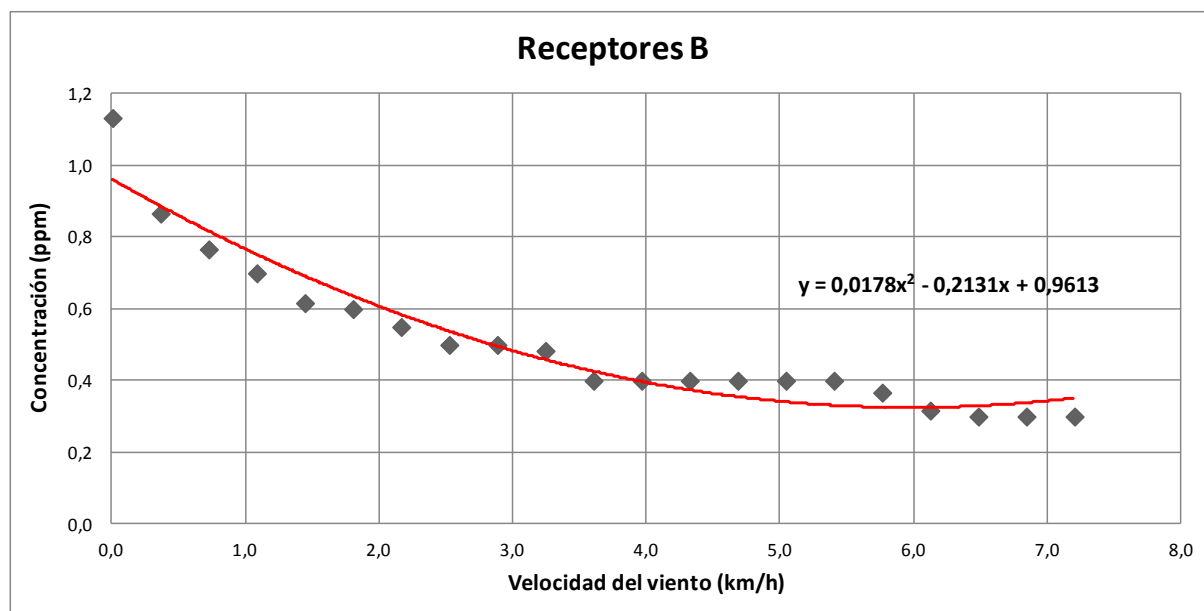


Figura 6-6: Concentración de CO en función de la velocidad del viento para los Receptores B (Dirección del viento: 180°)





En definitiva, para una dirección del viento de  $180^\circ$ , y en comparación con los resultados mostrados en el primer análisis de sensibilidad, la disposición de los seis nuevos receptores en este caso supone una disminución en la media de la concentración de CO obtenida. Tal y como se introdujo en el párrafo anterior, esto es debido a que los Receptores B se disponen en este caso de manera paralela a la dirección del viento, captando una menor cantidad de emisiones procedentes del tráfico.

Finalmente, a modo de resumen, en la tabla 6-5 se pueden consultar los valores máximos de concentración de CO obtenidos para ambas configuraciones, utilizando dos valores para la dirección del viento distintos.

	Configuración A		Configuración B	
Dirección viento ( $^\circ$ )	$137^\circ$	$180^\circ$	$223^\circ$	$180^\circ$
Concentración CO máxima (ppm)	0,6	2,0	0,9	1,1

Tabla 6-5: Comparación entre los resultados obtenidos para ambas configuraciones

## 6.4 Longitud del “link”

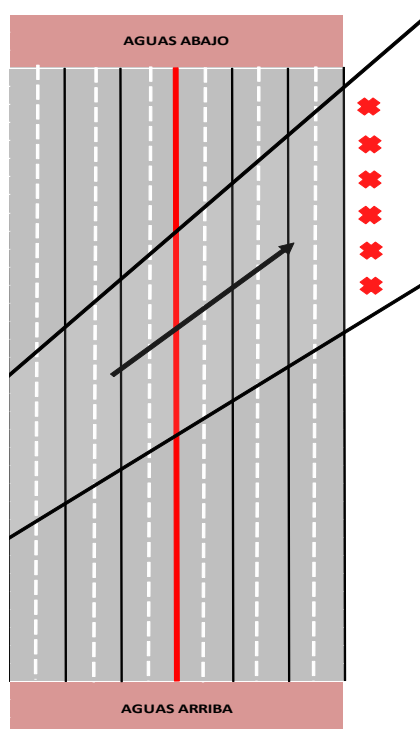
En este último apartado del segundo análisis de sensibilidad, se estudia el efecto de la longitud del link en los resultados de concentración de contaminantes obtenidos a través del modelo de dispersión. Al igual que en el primer análisis, se realizan dos estudios diferentes para una dirección del viento estándar establecida en esta ocasión en  $223^\circ$  y otra paralela a la carretera ( $180^\circ$ ), respectivamente.

Adicionalmente, y para cada uno de los dos valores de la dirección del viento, se realiza el estudio modificando la longitud del link aguas abajo en primer lugar y aguas arriba posteriormente. Como ya se indicó anteriormente, la altura

seleccionada para los Receptores B es de 1 m, con el objetivo de favorecer la obtención de mejores resultados.

Después de realizar las ejecuciones del modelo para cada una de las longitudes del link consideradas, en la tabla 6-6 se muestran los resultados de concentración de CO en los Receptores B obtenidos para el caso en el que la dirección del viento es de  $223^{\circ}$  y la longitud del link se incrementa aguas abajo. Si por el contrario se modifica la longitud del link aguas arriba (ver tabla 6-7), se obtiene que la concentración no cambia cuando el tramo de carretera que se amplía queda por debajo de los receptores, ya que el tramo añadido no tiene ninguna influencia sobre éstos. El motivo es que los contaminantes son arrastrados con un ángulo de  $223^{\circ}$  aguas abajo de los receptores. La figura 6-7 ayuda a comprender la situación previamente descrita.

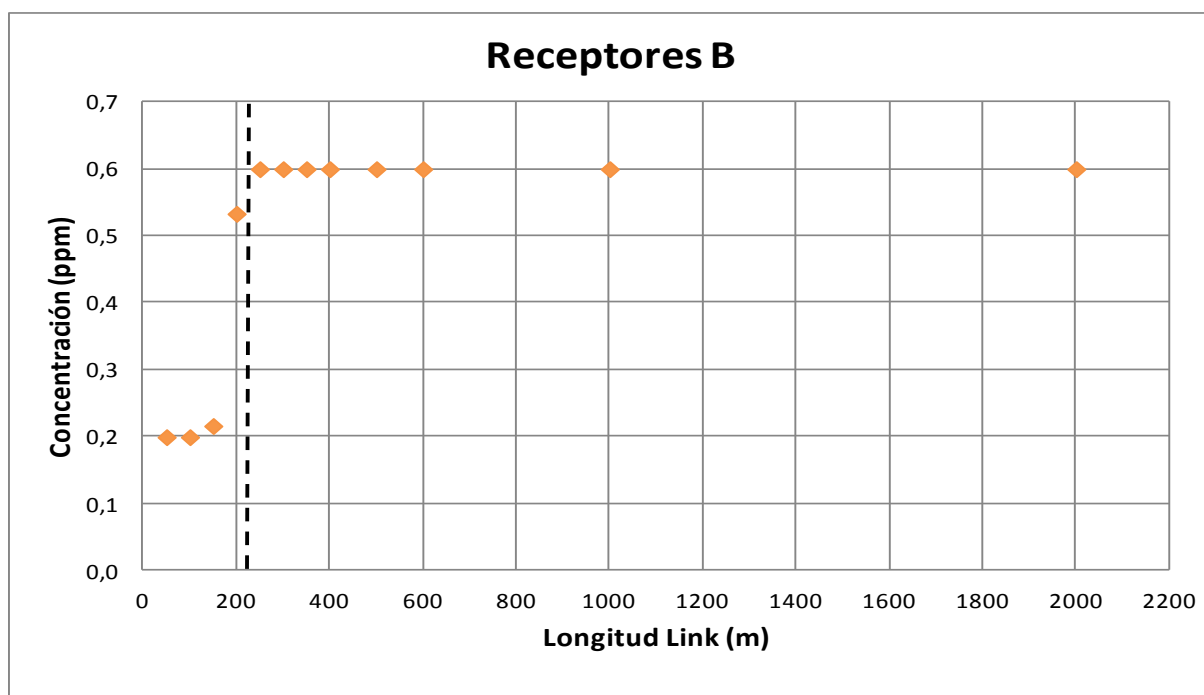
Los mencionados resultados se encuentran también reflejados en sus respectivas gráficas (ver figuras 6-8 y 6-9)



**Figura 6-7: Esquema de la dispersión de los contaminantes con una dirección del viento de  $223^{\circ}$**

DATOS		RESULTADOS						
Parámetros fijos	Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature <b>90 F = 32°C</b>	<b>Longitud Link (m)</b>	Media 6 Receptores B	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Relative Humidity <b>12%</b>								
Traffic Volume (vph) <b>2750</b>								
Emission Factor = <b>3,906 g/mille</b>	50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Speed <b>1,7 m/s</b>	100	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Wind Direction 223º</b>	150	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Wind Direction Standard Deviation <b>5º</b>	200	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5
Atmospheric Stability Class <b>2</b>	250	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Mixing Height <b>1000 m</b>	300	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ambient Pollutant Concentration = <b>0,2 ppm</b>	350	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
<b>Receptors B Height 1 m</b>	400	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	500	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	600	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	1000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	2000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

**Tabla 6-6: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para una dirección del viento de 223º**



**Figura 6-8: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para los Receptores B (Dirección del viento: 223º)**

DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature 90 F = 32°C		Longitud Link (m)	Media 6 Receptores B	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Relative Humidity 12%									
Traffic Volume (vph) 2750									
Emission Factor = 3,906 g/mille		400	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Wind Speed 1,7 m/s		450	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Wind Direction 223º		500	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Wind Direction Standard Deviation 5º		550	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Atmospheric Stability Class 2		600	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Mixing Height 1000 m		650	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Ambient Pollutant Concentration = 0,2 ppm		700	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Receptors B Height 1 m		750	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		800	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		900	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		1000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		2000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		3000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		4000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		5000	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Tabla 6-7: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para una dirección del viento de 223º

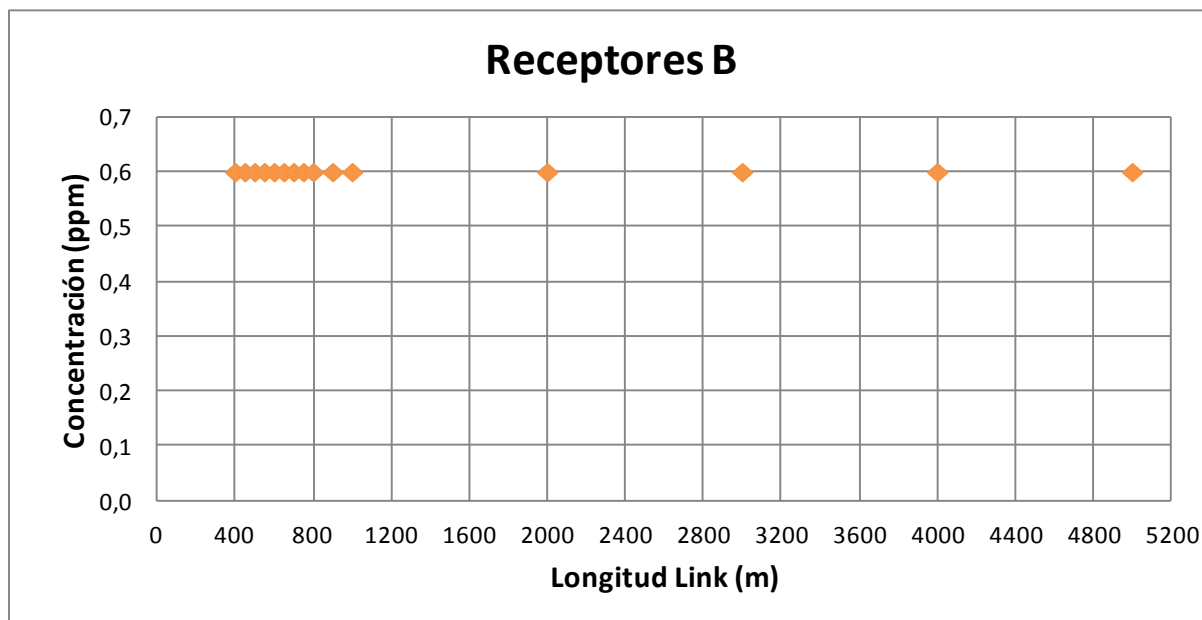


Figura 6-9: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para los Receptores B (Dirección del viento: 223º)



Si se analizan los resultados obtenidos para 223°, se puede concluir afirmando que en el primer caso se observa un aumento de la concentración a medida que se incrementa la longitud del link en el sentido favorable a la dirección del viento. Al igual que en los resultados reflejados en el primer análisis, se observa que una vez superada la posición en la que se encuentran los receptores (línea negra discontinua en la figura), la concentración se estabiliza y se mantiene en un valor constante de aproximadamente 0,6 ppm. En comparación con los resultados previos referentes a la configuración A, los valores de concentración que se obtienen son mayores.

Si por el contrario la longitud del link se incrementa en el sentido opuesto al viento, o aguas arriba, la concentración mostrada se mantiene constante ya que, a pesar de aumentar la longitud del tramo tenido en cuenta en el estudio, la dirección del viento no es paralela a la carretera y este hecho favorece la dispersión de los contaminantes procedentes de la ampliación del área de estudio hacia afuera de la posición definida para los receptores.

El mismo estudio se realiza estableciendo ahora una dirección del viento paralela a la carretera. Las tablas 6-8 y 6-9 muestran los resultados obtenidos, representados en sus respectivas gráficas (ver figuras 6-10 y 6-11).

Se recuerda que el comportamiento referente a los Receptores A se expuso en el primer análisis de sensibilidad realizado.

DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature <b>90 F = 32°C</b>		Longitud Link (m)							
Relative Humidity <b>12%</b>			Media 6 Receptores	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Traffic Volume (vph) <b>2750</b>			B						
Emission Factor = <b>3,906 g/mille</b>		50	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Wind Speed <b>1,7 m/s</b>		100	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Wind Direction <b>180º</b>		150	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Wind Direction Standard Deviation <b>5º</b>		200	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Atmospheric Stability Class <b>2</b>		250	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Mixing Height <b>1000 m</b>		300	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Ambient Pollutant Concentration = <b>0,2 ppm</b>		350	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Receptors B Height <b>1 m</b>		400	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		500	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		600	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		1000	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		2000	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Tabla 6-8: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para una dirección del viento de 180º

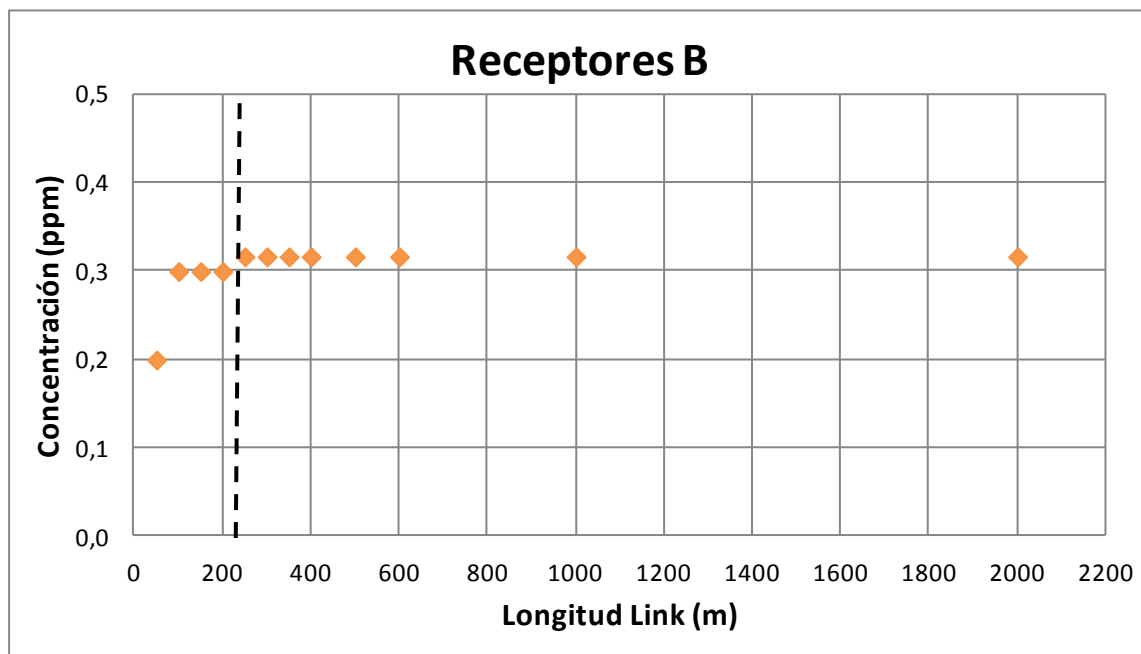


Figura 6-10: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas abajo)  
para los Receptores B (Dirección del viento: 180º)

DATOS			RESULTADOS						
Parámetros fijos		Parámetro variable	Concentraciones CO (CALINE4), ppm						
Temperature <b>90 F = 32°C</b>		Longitud Link (m)	Media 6 Receptores B	Rec. 1	Rec. 2	Rec. 3	Rec. 4	Rec. 5	Rec. 6
Relative Humidity <b>12%</b>									
Traffic Volume (vph) <b>2750</b>									
Emission Factor = <b>3,906 g/mille</b>		400	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Wind Speed <b>1,7 m/s</b>		450	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Wind Direction <b>180º</b>		500	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Wind Direction Standard Deviation <b>5º</b>		550	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Atmospheric Stability Class <b>2</b>		600	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Mixing Height <b>1000 m</b>		650	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Ambient Pollutant Concentration = <b>0,2 ppm</b>		700	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Receptors B Height <b>1 m</b>		750	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		800	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
		900	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		1000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		2000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		3000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		4000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
		5000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabla 6-9: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para una dirección del viento de 180º

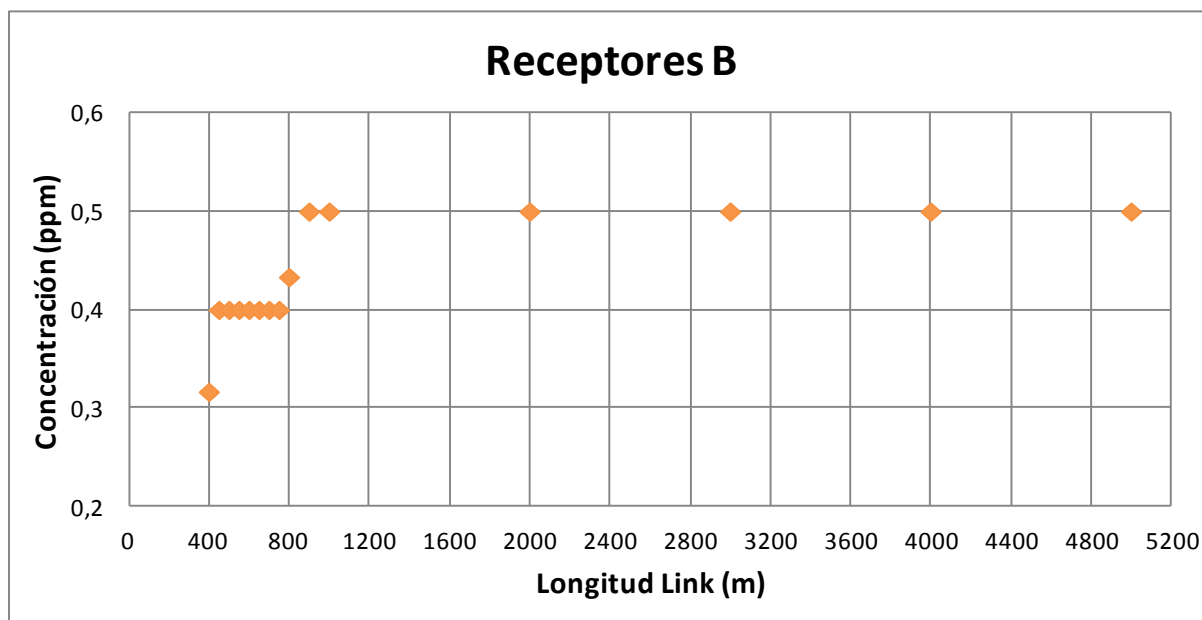


Figura 6-11: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba)  
para los Receptores B (Dirección del viento: 223º)

Para una dirección de viento de 180°, y centrando el estudio en el caso en el que se aumenta la longitud del link aguas abajo, lo que se observa es un comportamiento semejante al obtenido anteriormente. Las concentraciones recogidas por los Receptores B son más bajas en esta ocasión ya que se encuentran situados de forma paralela a la dirección en la que está soplando ahora el viento, hecho que perjudica la obtención de mejores resultados.

Por otro lado, cuando se aumenta la longitud del link aguas arriba, los resultados son mucho mejores que para el caso anterior, cuando el viento soplaba con una dirección de 223°. Al aumentar el tramo de carretera en estudio, el viento arrastra mayor cantidad de contaminantes hacia la posición en la que se encuentran los receptores. A pesar de ello, y como ya se ha explicado anteriormente, el hecho de que los Receptores B se sitúen de manera paralela al viento disminuye el valor total de la concentración obtenida, en comparación con los resultados encontrados para los Receptores A en el primer análisis de sensibilidad.

	Configuración A		Configuración B	
Dirección viento (°)	137°	180°	223°	180°
Concentración CO máxima (ppm) Aguas abajo	0,2	0,5	0,6	0,3
Concentración CO máxima (ppm) Aguas arriba	0,2	0,7	0,6	0,5

Tabla 6-10: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180°

	Configuración A		Configuración B	
Dirección viento (°)	137°	180°	223°	180°
Tramo que influye (m)	400	4000	400	900

Tabla 6-11: Concentración de CO en función de la longitud del link (aguas arriba) para una dirección del viento de 180°





En la tabla 6-10 se puede ver una comparativa de los valores de las concentraciones máximas obtenidas en cada configuración. Por otro lado, en la tabla 6-11 se muestra una estimación del tramo de vía que afecta a los receptores para las dos configuraciones. Como puede verse las concentraciones más altas se obtienen para  $180^\circ$  y la configuración A, en la que el tramo de vía que afecta es mayor. Sin embargo, para el mismo ángulo en la configuración B las concentraciones y el tramo relevante son más bajos, ya que como se ha dicho anteriormente los receptores se sitúan paralelos a la vía y al viento, que por tanto no arrastra los contaminantes de ningún tramo hacia los receptores.





## **7. INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA EMEP/CORINAIR**

Hasta ahora se han calculado los factores de emisión a través del programa EMFAC2007, el cual presenta un formato de salida apropiado para su uso por parte del modelo de dispersión CALINE4. Sin embargo, este es un programa desarrollado para su utilización en el Estado California, con las características de tráfico propias de esta región. Aunque inicialmente se hizo un estudio para comprobar qué escenario de los posibles reunía unas condiciones meteorológicas similares a las de Madrid, sería conveniente analizar cuáles pueden ser las variaciones derivadas de la aplicación de distintas metodologías de cálculo de factores de emisión.

La colaboración entre la Agencia Europea de Medio Ambiente (European Environment Agency, EEA, Web [12]) y el Programa Europeo de Control de Emisiones Contaminantes (European Monitoring and Evaluation Program, EMEP, Web [13]) ha propiciado el desarrollo de una guía que, siguiendo los procedimientos establecidos en la metodología EMEP/CORINAIR, sirve para preparar inventarios de emisiones a nivel nacional, siguiendo la línea que otras organizaciones europeas habían iniciado anteriormente. Esta guía proporciona una información concisa sobre cómo compilar un inventario de emisiones atmosféricas (EEA, 2009).

La última versión de la guía fue editada en 2009, siendo compatible y complementaria a otras guías como la emitida en 2006 acerca de los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories).

## 7.1 Objetivos de la Metodología

En general, la guía tiene dos funciones clave:

- Proporcionar los procedimientos adecuados para permitir a los usuarios compilar inventarios de emisiones que cumplan con los criterios de calidad para la transparencia, coherencia, integridad y precisión de los resultados.
- Proporcionar métodos de estimación y los factores de emisión para compilar los inventarios en los distintos niveles de precisión.

La guía puede ser utilizada para preparar los inventarios de emisiones de las diferentes sustancias definidas que, si son emitidas a la atmósfera como resultado de una actividad natural o humana, están implicadas en los siguientes procesos:

- La acidificación, la eutrofización y la contaminación fotoquímica.
- La degradación de la calidad del aire.
- Los daños y la suciedad en los edificios y otras estructuras.
- La exposición humana y de los ecosistemas a sustancias peligrosas.

Los inventarios preparados de acuerdo a esta guía son adecuados para proporcionar información precisa a los correspondientes responsables políticos de los países miembros de la Unión Europea, con el objetivo de definir las prioridades ambientales e identificar aquellas actividades responsables de los mayores problemas. Además, la guía sirve de ayuda para establecer los objetivos explícitos y las limitaciones, evaluando los impactos ambientales potenciales y las implicaciones de las diferentes estrategias y planes establecidos. Esto supone evaluar además los costes y beneficios en materia ambiental de las diferentes políticas llevadas a cabo en los países miembros.

Concretamente se dispone de una metodología específica para el cálculo de las emisiones debidas al tráfico rodado. Es más, existe un software desarrollado

para aplicar esta metodología, la herramienta COPERT4, la cual es analizada con más detalle en el siguiente apartado.

## 7.2 COPERT4

COPERT 4 es un software utilizado en el cálculo de las emisiones contaminantes procedentes del tráfico rodado. El desarrollo de COPERT está coordinado por la Agencia Europea de Medio Ambiente dentro del marco de actividades del Centro Europeo para la Contaminación del Aire y Mitigación del Cambio Climático. El Centro de Investigación de la Comisión Europea dirige el desarrollo científico del modelo desde el año 2007 (Web [14]).

La metodología de COPERT4 forma parte de la guía de inventario de emisiones contaminantes perteneciente a EMEP/EEA para el cálculo de emisiones. El uso de este software para el cálculo de las emisiones permite recoger información estandarizada y comparable y obtener informes de emisión de acuerdo a los requerimientos de los convenios internacionales y la legislación europea.

En definitiva, COPERT4 es un programa de apariencia Microsoft Windows destinado al cálculo de las emisiones contaminantes del transporte por carretera. En principio, este programa ha sido desarrollado para el uso de los expertos nacionales en la estimación de las emisiones del tráfico rodado que se incluyen posteriormente en los inventarios nacionales que se emiten oficialmente cada año.

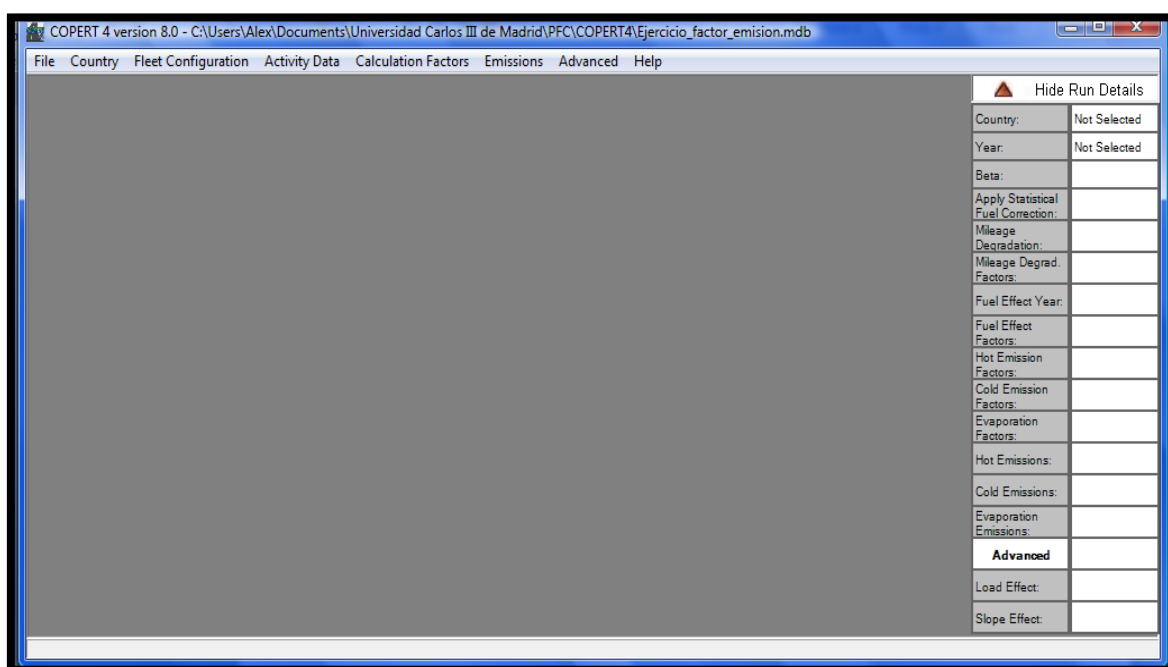


**Figura 7-1: Logo de COPERT4**

Fuente: Web [14]

## 7.2.1 Ejecución y resultados

A modo de breve guía del programa, a continuación se procede a explicar una pequeña introducción a la utilización de COPERT4, incluida la ejecución del modelo y la obtención de los diferentes resultados disponibles. Para una mayor información, se recomienda la lectura de la última versión del manual del programa desarrollada por la EEA (2007). En la figura 7-2 se muestra una vista general de la pantalla principal del programa.



**Figura 7-2: Vista de la pantalla principal de COPERT4**

Para comenzar, el usuario puede optar por editar un nuevo archivo de trabajo a partir del cual se ejecutará el modelo, o bien modificar un archivo ya existente. Después de ello, y si el usuario no es experimentado, se recomienda la utilización de la herramienta "Run Wizard" (ver figura 7-3), en la cual el programa muestra cada uno de los pasos que se han de seguir para la obtención satisfactoria de resultados. En el caso concreto de este proyecto se ha optado por utilizar esta opción, por lo

que la explicación a partir de ahora se centrará exclusivamente en los pasos a realizar dentro de este tipo de ejecución.

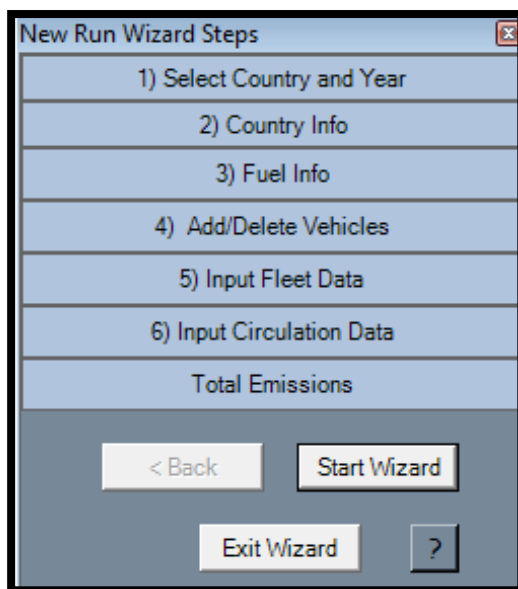


Figura 7-3: Herramienta "Run Wizard" de COPERT4

- **Paso 1: Select Country and year** – Se trata simplemente de seleccionar el país y el año en los cuales se va a realizar el inventario de emisiones. Para cada uno de los países definidos, el usuario puede establecer inventarios en distintos años y mantenerlos almacenados en el fichero de trabajo. Además, se han de definir los valores correspondientes para los parámetros  $L_{trip}$  y  $t_{trip}$ , que se definen como los valores medios anuales de la longitud y la duración de un viaje. La figura 7-4 muestra a modo de ejemplo una vista de la pantalla de COPERT4 en la que se realiza este paso.

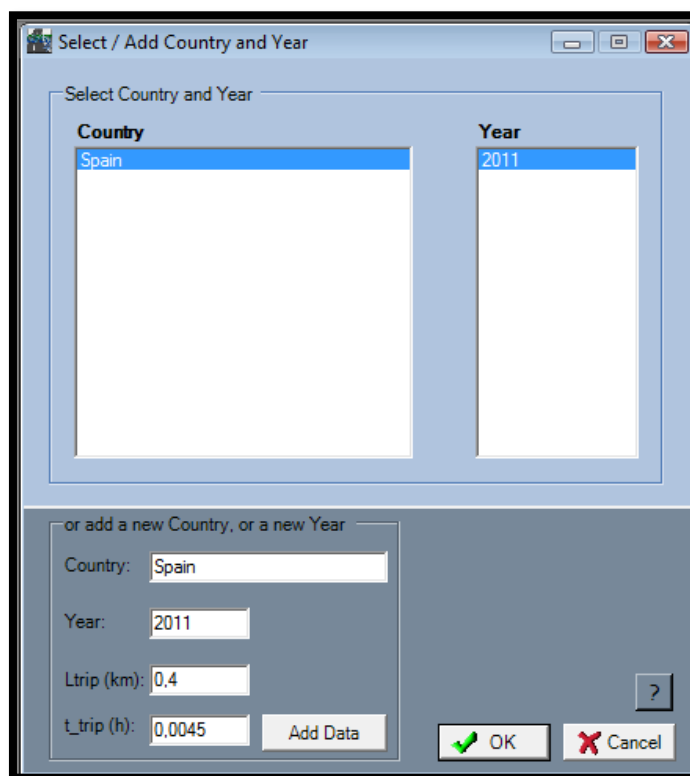


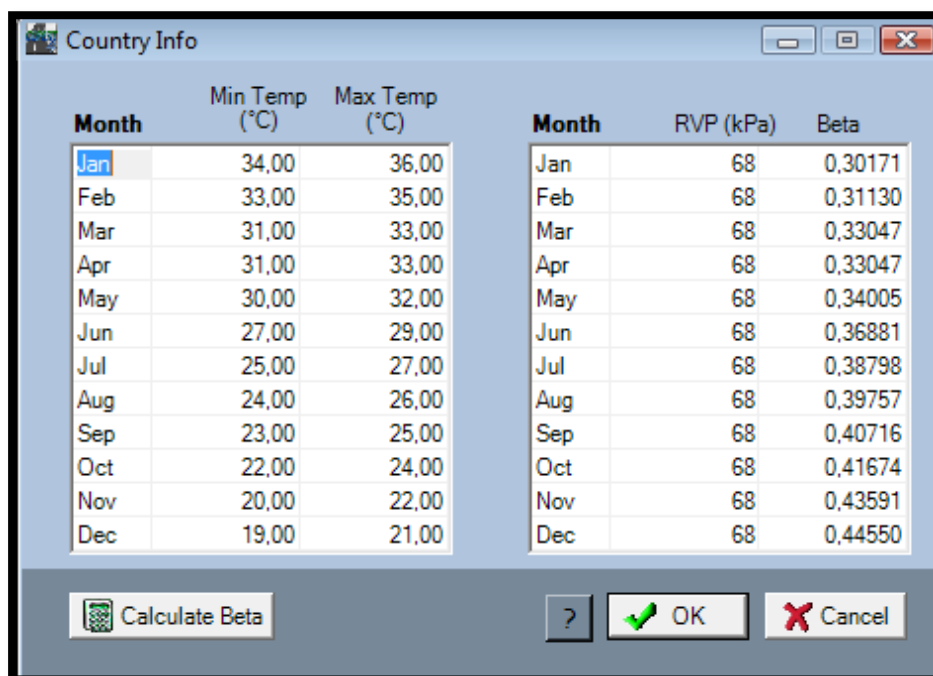
Figura 7-4: Pantalla “Select Country and Year” de COPERT4

- **Paso 2: Country Info** – En este paso el usuario debe definir los valores medios mínimos y máximos de temperatura para cada mes, además de la presión de vapor Reid (Reid Vapor Pressure, RVP<sup>2</sup>) y el parámetro Beta<sup>3</sup>. Este último parámetro puede ser calculado directamente por el programa mediante la opción “Calculate Beta” (ver figura 7-5)

<sup>2</sup> La Presión de Vapor Reid indica la tendencia que presenta un hidrocarburo líquido a volatilizarse

<sup>3</sup> El parámetro Beta representa la fracción del kilometraje mensual conducido antes de que el motor y el resto de componentes del escape hayan alcanzado su temperatura de operación nominal.



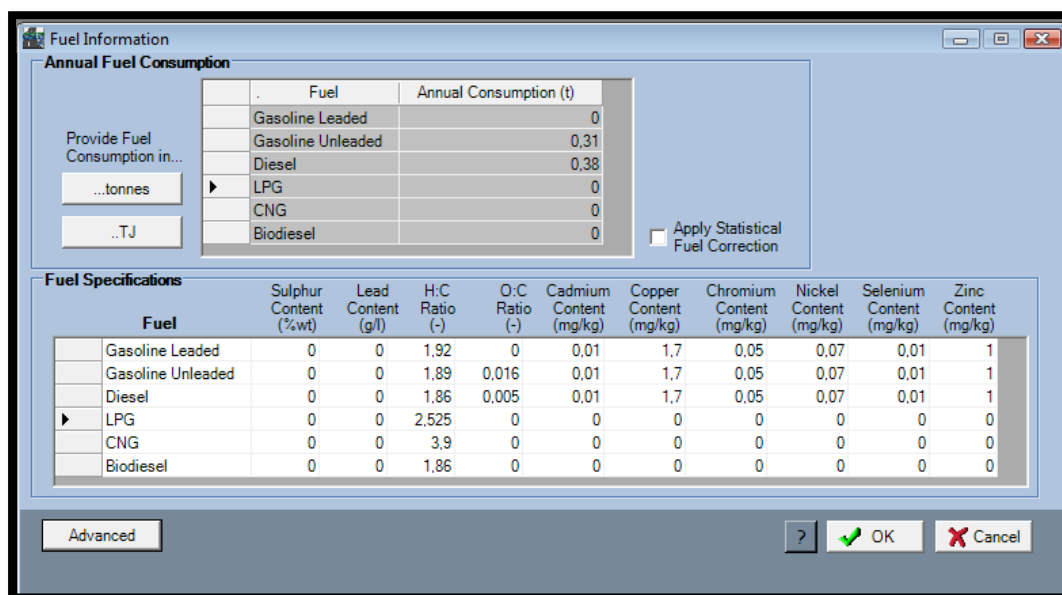


Month	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)
Jan	34,00	36,00
Feb	33,00	35,00
Mar	31,00	33,00
Apr	31,00	33,00
May	30,00	32,00
Jun	27,00	29,00
Jul	25,00	27,00
Aug	24,00	26,00
Sep	23,00	25,00
Oct	22,00	24,00
Nov	20,00	22,00
Dec	19,00	21,00

Month	RVP (kPa)	Beta
Jan	68	0,30171
Feb	68	0,31130
Mar	68	0,33047
Apr	68	0,33047
May	68	0,34005
Jun	68	0,36881
Jul	68	0,38798
Aug	68	0,39757
Sep	68	0,40716
Oct	68	0,41674
Nov	68	0,43591
Dec	68	0,44550

Figura 7-5: Pantalla "Country Info" de COPERT4

- **Paso 3: Fuel Info** – A continuación COPERT4 pide al usuario definir la información referente a los combustibles establecidos así como el consumo anual de cada uno de ellos para la ejecución de los cálculos necesarios. Cuatro tipos de combustible están incluidos en el programa: gasolina con y sin plomo, diesel y gases ligeros del petróleo. Sus principales características están ya predefinidas, pudiendo el usuario modificarlas en todo momento. La figura 7-6 muestra una vista de esta pantalla.



**Fuel Information**

**Annual Fuel Consumption**

Provide Fuel Consumption in...

Fuel	Annual Consumption (t)
Gasoline Leaded	0
Gasoline Unleaded	0,31
Diesel	0,38
LPG	0
CNG	0
Biodiesel	0

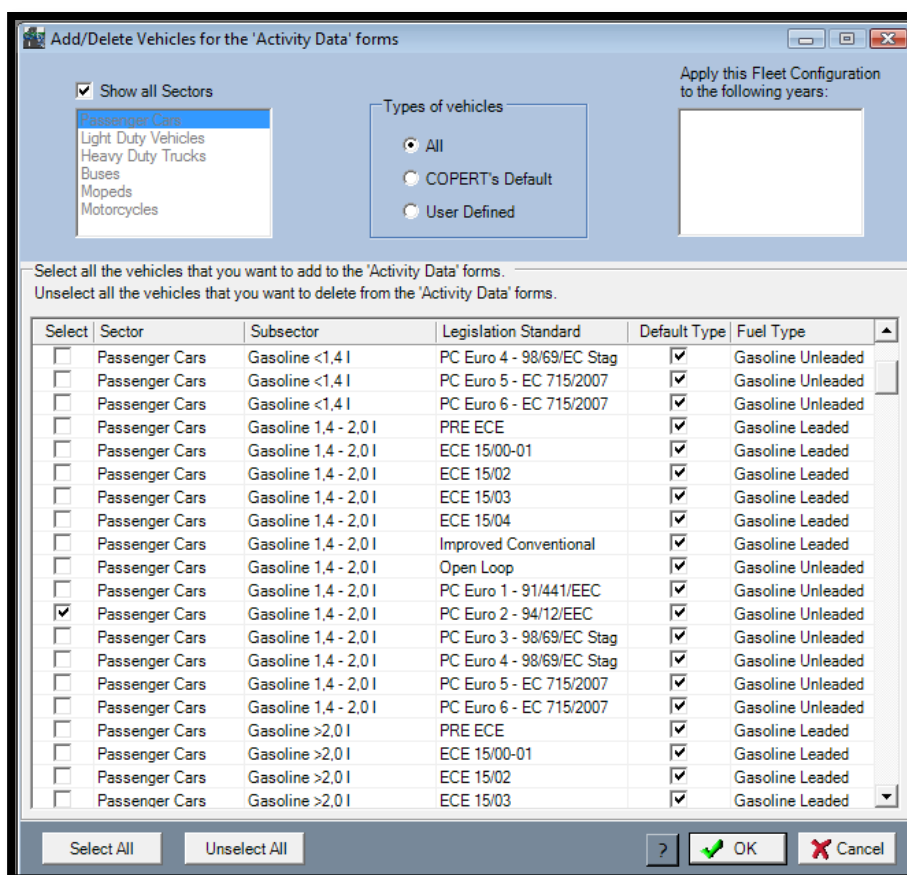
☐ Apply Statistical Fuel Correction

**Fuel Specifications**

Fuel	Sulphur Content (%wt)	Lead Content (g/l)	H:C Ratio (-)	O:C Ratio (-)	Cadmium Content (mg/kg)	Copper Content (mg/kg)	Chromium Content (mg/kg)	Nickel Content (mg/kg)	Selenium Content (mg/kg)	Zinc Content (mg/kg)
Gasoline Leaded	0	0	1,92	0	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
Gasoline Unleaded	0	0	1,89	0,016	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
Diesel	0	0	1,86	0,005	0,01	1,7	0,05	0,07	0,01	1
LPG	0	0	2,525	0	0	0	0	0	0	0
CNG	0	0	3,9	0	0	0	0	0	0	0
Biodiesel	0	0	1,86	0	0	0	0	0	0	0

Figura 7-6: Pantalla "Fuel Information" de COPERT4

- **Paso 4: Add/Delete Vehicles** – Ahora el usuario debe seleccionar qué tipos de vehículos serán tenidos en cuenta en la ejecución del modelo. Esto supone definir todos los tipos de vehículos que componen el parque automovilístico del país en cuestión dentro del año determinado. COPERT4 ofrece una lista con diferentes tipos de vehículos para cada sector, a los cuales el usuario puede añadir o eliminar los que crea oportuno. En la figura 7-7 se muestra la lista con algunos de los tipos de vehículos que ofrece el programa dentro de la pantalla correspondiente a este paso.



Add/Delete Vehicles for the 'Activity Data' forms

☒ Show all Sectors

Passenger Cars  
Light Duty Vehicles  
Heavy Duty Trucks  
Buses  
Mopeds  
Motorcycles

Types of vehicles

☒ All  
☐ COPERT's Default  
☐ User Defined

Apply this Fleet Configuration to the following years:

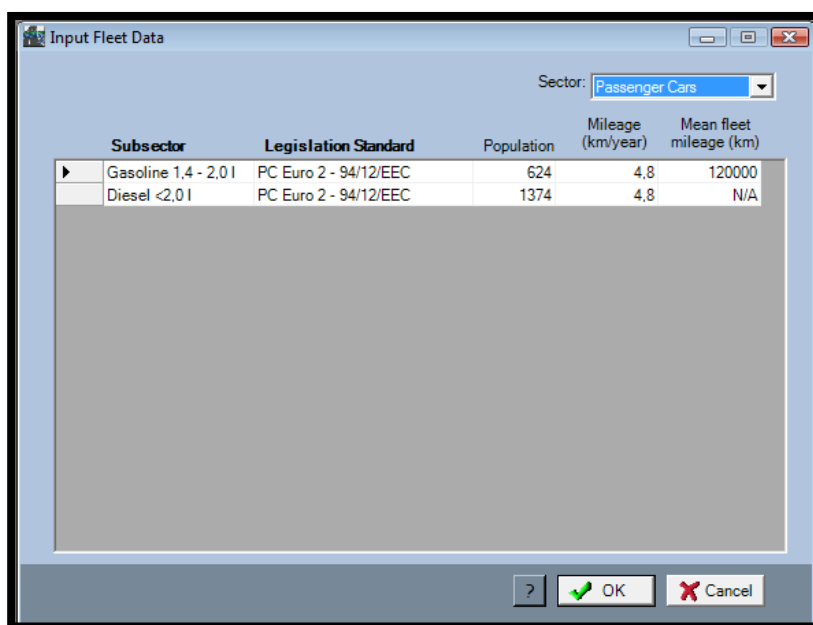
Select all the vehicles that you want to add to the 'Activity Data' forms.  
Unselect all the vehicles that you want to delete from the 'Activity Data' forms.

Select	Sector	Subsector	Legislation Standard	Default Type	Fuel Type
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline <1,4 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stag	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline <1,4 l	PC Euro 5 - EC 715/2007	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline <1,4 l	PC Euro 6 - EC 715/2007	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PRE ECE	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	ECE 15/00-01	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	ECE 15/02	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	ECE 15/03	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	ECE 15/04	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	Improved Conventional	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	Open Loop	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 1 - 91/441/EEC	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input checked="" type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 3 - 98/69/EC Stag	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 4 - 98/69/EC Stag	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 5 - EC 715/2007	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline 1,4 - 2,0 l	PC Euro 6 - EC 715/2007	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Unleaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	PRE ECE	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	ECE 15/00-01	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	ECE 15/02	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded
<input type="checkbox"/>	Passenger Cars	Gasoline >2,0 l	ECE 15/03	<input checked="" type="checkbox"/>	Gasoline Leaded

Select All Unselect All ? OK Cancel

Figura 7-7: Pantalla "Vehicles / Activity Data" de COPERT4

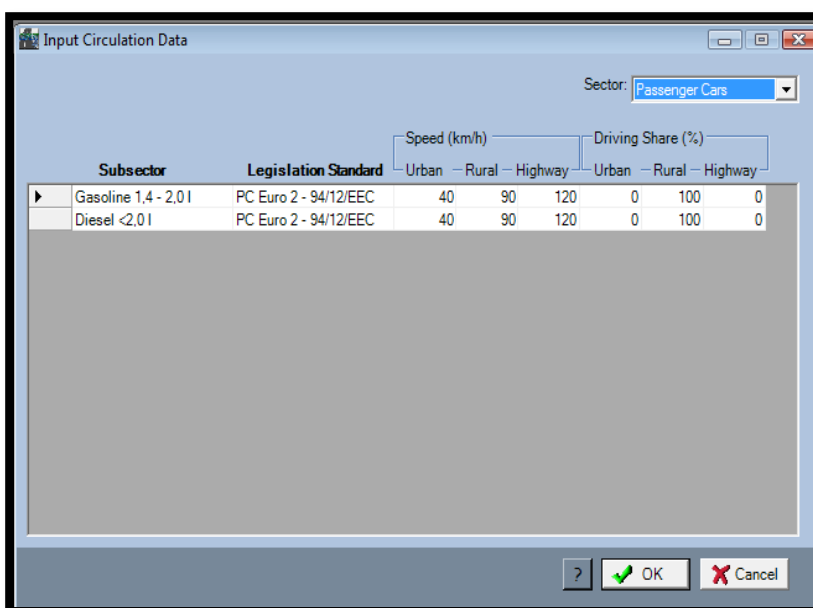
- **Paso 5: Input Fleet Data** – En este paso el usuario tiene que definir la información sobre la población, el kilometraje anual (km/año) y el kilometraje medio (km) para cada tipo de vehículo definido en el paso anterior (ver figura 7-8). El kilometraje medio hace referencia a la distancia media recorrida por los vehículos pertenecientes a cada una de las distintas tecnologías desde su introducción en el mercado.



Subsector	Legislation Standard	Population	Mileage (km/year)	Mean fleet mileage (km)
Gasoline 1.4 - 2.0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC	624	4,8	120000
Diesel <2.0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC	1374	4,8	N/A

Figura 7-8: Pantalla "Input Fleet Data" de COPERT4

**Paso 6: Input Circulation Data** – Por último, el usuario debe introducir la velocidad media y el porcentaje de utilización para cada una de las tecnologías de vehículos en cada modo de conducción (Urban - Urbano, Rural - Carretera o Highway - Autopista), tal y como se puede ver en la figura 7-9.



Subsector	Legislation Standard	Speed (km/h)			Driving Share (%)		
		Urban	Rural	Highway	Urban	Rural	Highway
Gasoline 1.4 - 2.0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC	40	90	120	0	100	0
Diesel <2.0 l	PC Euro 2 - 94/12/EEC	40	90	120	0	100	0

Figura 7-9: Pantalla "Input Circulation Data" de COPERT4

- **Resultados** – Una vez se han introducido los datos de entrada necesarios para realizar la ejecución del modelo, el usuario puede obtener los resultados en la pantalla correspondiente (ver figura 7-10). Se puede optar por calcular los factores de emisión (en frío o en caliente), los de evaporación o las emisiones (en frío, en caliente y totales). COPERT4 ofrece los resultados para cada uno de los tipos de vehículo dentro de cada modo de conducción definido y por cada contaminante.

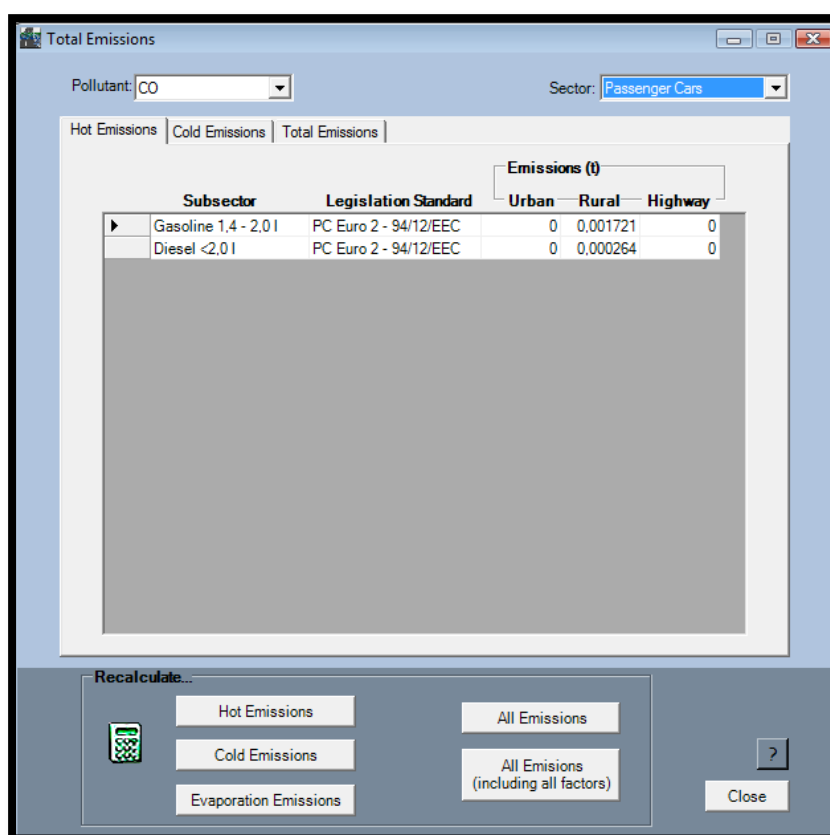


Figura 7-10: Pantalla "Total Emissions" de COPERT4

## 7.3 Aplicación de la metodología EMEP/CORINAIR a escalas temporales y espaciales reducidas

A la hora de la aplicación de la metodología europea EMEP/CORINAIR dentro del marco de este proyecto, se presenta un problema que afecta a la escala temporal y espacial del escenario de estudio. Dicho problema surge a raíz de que COPERT4 está pensado, tal y como se ha visto anteriormente, para la realización de inventarios a escala nacional dentro de un horizonte temporal de medidas mínimo de un año.

Por ese motivo se ha creído conveniente la realización de una primera aproximación a la utilización de COPERT4 en la obtención de las emisiones dentro de un tramo de carretera en concreto, con una escala temporal horaria y con un número reducido de vehículos. Es decir, cuando el programa se refiera a un país y a un año, aquí se hablará de una carretera y de un periodo de 12 horas (por cada uno de los meses del año).

Por lo tanto, en los siguientes apartados se explicará el proceso de introducción de datos en COPERT4 así como los resultados obtenidos en la modelización del mismo caso que se estudió en los análisis de sensibilidad detallados en apartados anteriores, de manera que sólo se tenga en cuenta el tramo de carretera establecido y un periodo temporal de 12 horas.

### 7.3.1 Introducción de los datos de entrada en COPERT4

Siguiendo los pasos definidos en el apartado 7.2.1, correspondientes a la herramienta "Run Wizard" de COPERT4, se han ido introduciendo los parámetros de entrada que se exponen a continuación dentro del modelo.

- **Country and year:** En el primer paso se ha definido España como el país en el que se realiza el estudio y el año 2011. Estos datos son irrelevantes en la obtención de resultados. Para los parámetros  $L_{trip}$  y  $t_{trip}$  se ha decidido

mantener los valores que por defecto ofrece el sistema (**12 km** y **0,2 h**, respectivamente), realizando al final del estudio diferentes modificaciones para observar su efecto en los resultados, tal y como se analizará más adelante.

- **Country Info:** En este caso se ha definido la temperatura máxima y mínima para cada una de las horas, en lugar de meses, de un supuesto estudio de 12 horas de duración en un día cualquiera del mes de Julio. La información se ha sacado de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, Web [15]), que ofrece los valores horarios de temperatura para cualquier día seleccionado en la estación meteorológica que el usuario escoja. En este caso se ha seleccionado la estación de Pozuelo de Alarcón (por su mayor cercanía al lugar del estudio sobre el que se ha centrado este proyecto) y el día 24 de Julio de 2011. Los datos de temperatura para el rango temporal comprendido entre las 12:00 y las 00:00 se muestra en la tabla 7-1. En dicha tabla se muestra también el valor de la presión de vapor Reid (RVP) establecida para cada una de las horas definidas, que se supone constante ya que simplemente se obtuvo el dato genérico para los meses de verano en la guía EMEP/CORINAIR.

Temperaturas	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10	Hora 11	Hora 12
Máx (°C)	36	35	33	33	32	29	27	26	25	24	22	21
Min (°C)	34	33	31	31	30	27	25	24	23	22	20	19
RVP (kPa)	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68

**Tabla 7-1: Temperatura y Presión de Vapor Reid horaria**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [15] y EEA (2009)

- **Fuel Info:** En este apartado se definen los dos tipos de combustible que se van a tener en cuenta en este estudio, concretamente la **gasolina sin plomo** y el **diesel**. Se considera despreciable la contribución de otros combustibles dado el intervalo temporal del que se está hablando y el porcentaje de estos vehículos en el parque automovilístico (ver Anexo II). Las características de cada uno de los combustibles se mantienen sin variación en los valores predefinidos dentro del programa. Por otro lado, se tiene que especificar el consumo anual, en este caso

el consumo en 12 horas, de cada uno de los dos combustibles establecidos. Para obtener este dato se ha utilizado la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo 12 horas (T)} = \text{Nº vehículos} * \text{Consumo (l/km)} * \text{Distancia (km)} * \\ \text{Densidad combustible (kg/l)} * 1/1000 \text{ (kg/T)}$$

En primer lugar hay que definir cada uno de los parámetros incluidos en la fórmula anterior para cada uno de los dos combustibles utilizados. Se parte de un número de vehículos por hora de **2750**, ya definido en el apartado 5.2.2. A partir de ahí, y con las estadísticas oficiales que ofrece la DGT para la Comunidad de Madrid (ver tabla 7-2), se obtiene el número de vehículos gasolina y diesel circulando dentro del escenario de estudio en el rango de 12 horas. Las estadísticas completas se pueden consultar en el Anexo II.

	TOTAL GENERAL				Gasolina	Diesel	Otros
	GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL			
Madrid	1858907	2401521	2784	4263212	44%	56%	0%

**Tabla 7-2: Estadísticas parque automovilístico por tipo de combustible**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [11]

$$\text{Nº Vehículos Gasolina} = 2750 \text{ (veh/h)} * 12 \text{ h} * 44\% = \mathbf{14520 \text{ vehículos}}$$

$$\text{Nº Vehículos Diesel} = 2750 \text{ (veh/h)} * 12 \text{ h} * 56\% = \mathbf{18480 \text{ vehículos}}$$

Por otro lado hay que establecer el consumo en litros por hora y la densidad de cada tipo de combustible. Según estudios del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, Web [16]) se puede definir un consumo medio de gasolina de **7 litros por cada 100 km recorridos** y de **6 litros por cada 100 km** en el caso del diesel. Con respecto a la densidad de los combustibles, se establece un valor de **0,7575 kg/l** para la gasolina y de **0,8543 kg/l** para el diesel según los datos ofrecidos por la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM, Web [17]). Por último, se define una longitud recorrida por los vehículos de **400 m** (correspondiente a la longitud del link definida en los



análisis de sensibilidad realizados). Con todo esto, el consumo total de cada combustible dentro de las 12 horas que abarca el estudio queda como sigue:

$$\text{Consumo Gasolina (T)} = 14520 \text{ (veh)} * 7/100 \text{ (l/km)} * 0,4 \text{ (km)} * 0,7575 \text{ (kg/l)} * \\ 1/1000 \text{ (T/kg)} = \mathbf{0,31 \text{ Toneladas}}$$

$$\text{Consumo Diesel (T)} = 18480 \text{ (veh)} * 6/100 \text{ (l/km)} * 0,4 \text{ (km)} * 0,8543 \text{ (kg/l)} * \\ 1/1000 \text{ (T/kg)} = \mathbf{0,38 \text{ Toneladas}}$$

- **Types of Vehicles and Fleet data:** Aquí simplemente se han seleccionado los tipos de vehículos que se van a considerar en el estudio y se establece, para cada uno de ellos, la población, el kilometraje anual (que en este caso será el kilometraje en 12 horas) y el kilometraje medio (km). Para determinar el volumen de vehículos de cada clase se ha utilizado de nuevo la estadística realizada por la DGT para la Comunidad de Madrid (ver tabla 7-3), partiendo de la base de que la población total es de **2750 vehículos/hora**. Es importante hacer notar que, ya que las estadísticas oficiales no establecen una diferenciación del conjunto de motocicletas por su cilindrada, se ha supuesto que aquellas menores de 250 cc son despreciables en este caso, mientras que las que poseen una cilindrada entre 250 y 750 cc suponen un 3,24% del total de vehículos y las de mayor cilindrada un 3% del total. Por su parte, el kilometraje se calcula teniendo en cuenta las 12 horas de duración del estudio y los 400 m de longitud de la carretera en cuestión. Con respecto al kilometraje medio, se ha creído oportuno mantener los valores que por defecto ofrece el programa. En la tabla 7-4 se muestran los tipos de vehículos tenidos en cuenta junto con su población correspondiente, calculada a partir de las estadísticas ya mencionadas. Finalmente, en la tabla 7-5, se muestra un resumen con los tipos de vehículos definidos junto con sus correspondientes parámetros.

Turismos			
GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
35,18%	41,14%	0,01%	76,33%
Vehículos de carga ligeros			
GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
1,57%	13,42%	0,01%	14,99%
Vehículos de carga pesados			
GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
0,66%	1,46%	0,05%	2,17%
Autobuses			
GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
0,00%	0,26%	0,00%	0,27%
Motocicletas			
GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
6,23%	0,01%	0,00%	6,24%
TOTAL			100,00%

**Tabla 7-3: Estadísticas del parque automovilístico por tipo de vehículo y de combustible**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [11]

Flota de vehículos					
TOTAL VEHÍCULOS			2750 vehículos/hora		
Ligeros			Pesados		
Tipología de Vehículo	%	Vehículos	Tipología de Vehículo	%	Vehículos
Vehículos de gasolina de pasajeros (Gasolina PC).	35,18%	968	Vehículos Diesel pesados, de carga superior de 7,5 a 12t. (Diesel LDV).	1,46%	40
Vehículos Diesel de pasajeros (Diesel PC).	41,14%	1.131	Autobuses urbanos y de largo recorrido	0,27%	7
Vehículos de gasolina de carga ligeros, inferiores a las 3,5 t (Gasolina LDV).	1,57%	43			
Vehículos Diesel de carga ligeros, inferiores a las 3,5t (Diesel LDV).	13,42%	369			
Motocicletas de 4 tiempos de cilindrada 50 cc -250 cc	-	Despreciable			
Motocicletas de 4 tiempos de cilindrada 250 cc -750 cc	3,24%	89			
Motocicletas de 4 tiempos de cilindrada >750 cc	3,00%	83			

**Tabla 7-4: Número de vehículos por tipo**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [11]



	Population	Kilometraje (anual -> 12 horas)
▪ Vehículos de gasolina de pasajeros (Gasolina PC) (1,4-2,0 litros)	968	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Vehículos Diesel de pasajeros (Diesel PC) (<2 litros)	1131	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Vehículos de gasolina de carga ligeros, inferiores a las 3,5t (Gasolina LDV).	43	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Vehículos Diesel de carga ligeros, inferiores a las 3,5t (Diesel LDV).	369	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Vehículos Diesel pesados, de carga superior de 7,5 a 12t. (Diesel LDV).	40	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Autobuses urbanos y de largo recorrido	7	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Motocicletas de 4 tiempos de 50-250 cm <sup>3</sup>	0	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Motocicletas de 4 tiempos de 250-750 cm <sup>3</sup>	89	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km
▪ Motocicletas de 4 tiempos de >750 cm <sup>3</sup>	83	$0,4 \cdot 12 = 4,8$ km

Tabla 7-5: Número de vehículos y kilometraje por tipo

- **Circulation data:** Se procede ahora a rellenar los campos de velocidad media de circulación para los tres modos de conducción identificados (urbano, carretera y autopista), así como el porcentaje de vehículos que, para cada uno de los tipos establecidos, llevan a cabo estos modos de conducción. Para la zona de estudio se ha considerado que el único modo de conducción es **carretera** (se le asigna el **100%** para todos los tipos de vehículos) mientras que la velocidad media para este modo se establece en **90 km/h**, que se corresponde con el límite de velocidad de la vía.

### 7.3.2 Resultados

Tras la introducción de los parámetros de entrada y la ejecución del modelo, los resultados para las emisiones totales (en caliente y en frío) de monóxido de carbono que COPERT4 ofrece se resumen en la tabla 7-6. Se puede observar que los datos ofrecidos están en toneladas, aunque se ha calculado una tasa de emisiones en gramos por hora para una mejor comprensión del dato.

TOTAL CO EMISSIONS (HOT + COLD), Tons		
Vehículos de pasajeros	0,00342	0,00026
Vehículos de carga ligeros	0,00029	0,00089
Vehículos de carga pesados		0,00014
Autobuses	0,00004	
Motocicletas	0,00163	0,00152
<b>TOTAL</b>		
		<b>0,00819 Toneladas</b>
Entre 12 horas --->	<b>0,00068 T/hora</b>	
	<b>682,80583 g/hora</b>	

**Tabla 7-6: Emisiones de CO (g/hora)**

Con el objetivo de evaluar los resultados obtenidos, se va a realizar una comprobación de carácter muy simple, de modo que se pueda concluir si la metodología EMEP/CORINAIR, a través del programa COPERT4, puede ser aplicada o no a escalas temporales y espaciales reducidas.

La mencionada comprobación consiste en obtener un dato genérico que exprese la media de emisiones de CO por kilómetro del parque automovilístico, para multiplicarla más tarde por la distancia recorrida (en este caso 400 m) y por el número de vehículos (2750 para nuestro estudio). Para obtener esa tasa de emisiones de CO, se van a utilizar los valores que la Unión Europea establece como límite para cada tipo de vehículo en la normativa EURO5 (Reglamento (CE) nº 715/2007), la cual fue aprobada por el Parlamento Europeo en 2007. La tabla 7-7 resume esos valores y muestra un valor genérico para la flota de vehículos tenida en cuenta en este estudio, calculada a partir del correspondiente porcentaje de cada tipo de vehículo. Hay que destacar que las motocicletas no están incluidas dentro de la normativa EURO5, aunque se espera que durante el año 2011 se apruebe la creación de una nueva normativa de emisiones a la que tendrá que atenerse la industria de las dos ruedas y que obligará a este tipo de vehículos a cumplir con la exigente EURO5. Por lo tanto, los datos establecidos para las motocicletas se basan en este caso en los límites establecidos en la normativa EURO3.

	%	Límite emisiones CO (g/km) según EURO5
▪ Vehículos de gasolina de pasajeros (Gasolina PC) (1,4-2,0 litros)	35,18%	1,00
▪ Vehículos Diesel de pasajeros (Diesel PC) (<2 litros)	41,14%	0,50
▪ Vehículos de gasolina de carga ligeros, inferiores a las 3,5t (Gasolina LDV).	1,57%	2,27
▪ Vehículos Diesel de carga ligeros, inferiores a las 3,5t (Diesel LDV).	13,42%	0,74
▪ Vehículos Diesel pesados, de carga superior de 7,5 a 12t. (Diesel LDV).	1,46%	1,50
▪ Autobuses urbanos y de largo recorrido	0,27%	1,50
▪ Motocicletas de 4 tiempos de 50-250 cm3 *	0,00%	2,00
▪ Motocicletas de 4 tiempos de 250-750 cm3 *	3,24%	2,00
▪ Motocicletas de 4 tiempos de >750 cm3 *	3,00%	2,00
<b>* Los datos para las motocicletas son los correspondientes a la normativa EURO 3</b>	<b>TOTAL</b>	<b>0,84</b>

**Tabla 7-7: Límite de emisiones de CO según la normativa europea**

Fuente: Elaboración propia a partir de Web [6] y la normativa Europea

Por lo tanto, nuestro cálculo de comprobación quedaría como sigue:

Emisiones (g/hora) = 0,84 (g/km) \* 0,4 (km) \* 2750 (veh/hora); entonces:

**Emisiones (g/hora) = 924 g/hora**

A la vista de los resultados y siempre teniendo en cuenta que los estudios realizados son simplemente una primera aproximación a la utilización de COPERT4 en escalas temporales y espaciales reducidas, se puede concluir diciendo que las emisiones obtenidas resultan ser coherentes con la comprobación realizada, ya que ambos valores se encuentran en el mismo orden de magnitud, máxime cuando para la comprobación se han utilizado valores límite.

La aplicación de estadísticas generales y de tasas de emisión y datos genéricos hacen que este estudio no se encuentre del todo cercano a lo que realmente se pueda encontrar en la carretera objeto de estudio. Sin embargo, este estudio ofrece una primera visión optimista de la utilización de COPERT4 como herramienta para el análisis de las emisiones contaminantes procedentes del tráfico rodado dentro de un marco espacio-tiempo reducido bajo las premisas de la metodología europea EMEP/CORINAIR.



### 7.3.2.1 Diesel vs. Gasolina

A la vista de los resultados reflejados en el apartado anterior, y dado el hecho de que los datos considerados para los vehículos provienen de la estadística general ofrecida por la DGT, se decide ampliar ahora el estudio para analizar la influencia del tipo de combustible utilizado en las emisiones de CO.

Este estudio es muy importante ya que para calcular las emisiones a partir de datos de tráfico, se necesitaría saber el tipo de combustible que utiliza cada uno de los vehículos que recorren la vía. La única forma de determinar el combustible que utiliza cada vehículo sería registrar su matrícula y solicitar esa información a la DGT. De cualquier modo, el cálculo no podría hacerse en tiempo real. Una solución consiste en aplicar el porcentaje de vehículos diesel y gasolina de la Comunidad Autónoma de Madrid a los vehículos que recorren la vía. Este estudio servirá para evaluar el impacto que tendría en el cálculo de factores de emisión el error introducido al aplicar dicho porcentaje para determinar cuántos vehículos son de gasolina y cuántos diesel.

Según se pudo ver en la tabla 7-2, el número de vehículos diesel supone el 56% del total del parque automovilístico de la Comunidad de Madrid, siendo el resto de gasolina. Ahora se va a suponer que en el tramo de carretera objeto de estudio existen, por el contrario, un 56% de vehículos gasolina por un 44% de vehículos diesel. Esto se hace con el objetivo de cuantificar la importancia que tiene una buena caracterización del tráfico a la hora de calcular las emisiones contaminantes.

En las tablas 7-8 y 7-9 se muestra el número de vehículos por combustible y por tipo, respectivamente, que se utilizan para realizar este estudio.

TOTAL	GASOLINA	DIESEL
2.750	1.552	1.198
100,00%	56%	44%

**Tabla 7-8: Número de vehículos y porcentajes por tipo de combustible**

Con estos datos, y procediendo de la misma manera que en el caso anterior, se obtienen los resultados buscados para las emisiones procedentes del tráfico. En la tabla 7-10 se expone el valor concreto para las emisiones totales de monóxido de carbono en gramos por milla.

Flota de vehículos					
TOTAL VEHÍCULOS			2750 vehículos/hora		
Ligeros			Pesados		
Tipología de Vehículo	%	Vehículos	Tipología de Vehículo	%	Vehículos
Vehículos de gasolina de pasajeros (Gasolina PC).	41,82%	1.150	Vehículos Diesel pesados, de carga superior de 7,5 a 12t. (Diesel LDV).	1,46%	40
Vehículos Diesel de pasajeros (Diesel PC).	34,55%	950	Autobuses urbanos y de largo recorrido	0,29%	8
Vehículos de gasolina de carga ligeros, inferiores a las 3,5 t (Gasolina LDV).	8,36%	230			
Vehículos Diesel de carga ligeros, inferiores a las 3,5t (Diesel LDV).	7,27%	200			
Motocicletas de 4 tiempos de cilindrada 50 cc -250 cc	-	Despreciable			
Motocicletas de 4 tiempos de cilindrada 250 cc -750 cc	3,24%	89			
Motocicletas de 4 tiempos de cilindrada >750 cc	3,00%	83			

**Tabla 7-9: Número de vehículos por tipo**

TOTAL CO EMISSIONS (HOT + COLD), Tons		
Vehículos de pasajeros	0,00317	0,00018
Vehículos de carga ligeros	0,00128	0,00047
Vehículos de carga pesados		0,00014
Autobuses	0,00004	
Motocicletas	0,00163	0,00152
<b>TOTAL</b>		
		<b>0,00845 Toneladas</b>
Entre 12 horas --->	<b>0,00070 T/hora</b>	
	<b>703,95333 g/hora</b>	

**Tabla 7-10: Emisiones de CO (g/hora)**

Analizando los resultados obtenidos, se observa que un incremento del 12% en el número de vehículos gasolina en detrimento de los diesel supone también un aumento en las emisiones de aproximadamente 21 g/milla (pasando de 682,80583 g/milla a 703,95333 g/milla). Este dato supone una variación del 3,1%, lo cual lleva a la conclusión de que la clasificación mediante los porcentajes del parque automovilístico podría ser una buena opción si se asume un margen de error. No obstante, sería conveniente hacer alguna campaña de medida orientada a medir cuál puede ser la desviación del porcentaje real de vehículos diesel y gasolina frente a los porcentajes estadísticos de la Comunidad de Madrid.

A modo de comprobación, se puede consultar de nuevo la tabla 7-7 en la que se reflejan los valores límite de emisión de CO para cada tipo de vehículo según la normativa EURO 5. Como se puede observar, los vehículos gasolina tienen un límite superior ya que emiten una mayor cantidad de este gas, en concreto su límite en los turismos es de 1 g/km por un valor de 0,5 g/km para aquéllos que utilizan diesel como combustible. Por lo tanto, el aumento obtenido para las emisiones de monóxido de carbono dentro de la carretera en estudio resulta ser coherente.



### 7.3.2.2 Análisis del Factor de Emisión

Como conclusión a este estudio basado en la metodología EMEP/CORINAIR, se ha querido establecer una comparación entre los resultados obtenidos para el factor de emisión mediante COPERT4 y los que se obtuvieron en el primer análisis de sensibilidad mediante EMFAC2007.

Para poder realizar una correcta comparación, se han de fijar una serie de parámetros de entrada iguales en ambos modelos. Por ello, se ha decidido utilizar las estadísticas del parque automovilístico de la Comunidad de Madrid en los cálculos. La velocidad de los vehículos, tal y como ya fue explicado en el apartado 5.3.3, se fija en 115 km/h siguiendo la recomendación de CALINE4 acerca de establecer el peor escenario observado dentro del modelo de dispersión. Sin embargo, COPERT4 no ofrece la posibilidad de introducir un valor explícito para la velocidad de los vehículos ya que se trata de un programa de propósito nacional y anual. Por lo tanto, se ha hecho una modificación en el apartado correspondiente a los datos de circulación, indicando que el 100% de los vehículos circulan en autopista a una velocidad de 115 km/h. De esta manera, se está simulando la circulación de 2750 vehículos por hora, clasificados según las estadísticas mencionadas, en un tramo de 400 m de autopista y con una velocidad media de 115 km/h.

Una vez establecidos los parámetros de entrada que se van a utilizar en la modelización mediante ambas metodologías, se procede a realizar la ejecución de los programas y a analizar los resultados. El resultado obtenido a través de EMFAC2007 ya fue expuesto en el análisis de sensibilidad correspondiente al factor de emisión (ver apartado 5.3.7) aunque en la tabla 7-11 se muestra el resumen de los resultados obtenidos mediante ambos métodos.

	EMFAC2007	COPERT4
Factor de emisión (g/milla)	4,847	2,126

Tabla 7-11: Factor de emisión para el CO (g/milla) calculado mediante EMFAC2007 y COPERT4



Los datos reflejan una amplia diferencia entre ambas metodologías. Concretamente, con EMFAC2007 se obtuvo un resultado que supera al ofrecido por COPERT4 en un 128%. Las razones de esta diferencia pueden venir de la utilización de COPERT4 en una escala espacio-temporal para la cual no ha sido desarrollado. Por otra parte, los valores de las variables meteorológicas utilizados en EMFAC2007 son los correspondientes a la ciudad de Sacramento, ya que el programa no permite la modificación de estos datos, hecho que podría implicar también una diferencia en el resultado dado que los datos introducidos en COPERT4 son los correspondientes a la región de Madrid y, aunque resultan ser similares, mantienen ciertas diferencias.



## 8. CONCLUSIONES

Como conclusión a este proyecto fin de carrera se puede realizar un breve resumen de los resultados más importantes encontrados en los diferentes estudios y análisis desarrollados.

La conclusión fundamental que se extrae de los estudios de sensibilidad es que la baja precisión que el modelo de dispersión utilizado, CALINE4, presenta en los resultados de concentración de contaminantes (tan sólo una cifra decimal) no favorece el análisis de sensibilidad específico para cada uno de los parámetros de entrada considerados, su uso para el cálculo de emisiones a partir de la concentración o la verificación de la metodología del cálculo de emisiones a partir de datos de tráfico. No obstante, ha permitido obtener importantes conclusiones que han aportado una información muy valiosa en cuanto a la utilización de modelos de dispersión en las metodologías del cálculo de emisiones que el grupo de investigación del LIR estudia.

Aunque de los parámetros estudiados los más relevantes son la dirección y velocidad del viento y la longitud del link, del estudio de todos los parámetros pueden extraerse conclusiones relevantes.

- **Factores asociados al tráfico**

En el primer análisis llevado a cabo se obtuvo una baja sensibilidad del modelo de dispersión a la variación de la velocidad de los vehículos, lo cual disminuye los requerimientos del SCT en las campañas de medidas. Sin embargo, los resultados obtenidos para velocidades altas, por encima del límite específico de la vía, sí repercuten en mayor medida en la concentración de contaminantes dentro del área de estudio, por lo que se recomienda proseguir las investigaciones del dispositivo



SCT para continuar con la mejora de la medida de la velocidad si se pretende utilizar sus datos para el cálculo de emisiones en cualquier escenario de velocidades. Si nos centramos en el comportamiento del factor de emisión con la velocidad, la importancia de limitar la velocidad para controlar las emisiones del tráfico a la atmósfera es evidente.

Siguiendo con factores asociados al tráfico, se ha comprobado que, aunque las emisiones dependan del número de vehículos, su repercusión en las concentraciones calculadas por el modelo de dispersión no es significativa.

En cuanto al tipo de vehículos, se ha comprobado que un error de un 10% en la clasificación de los vehículos (turismos, vehículos de carga ligeros y pesados) no afecta apreciablemente al valor de los factores de emisión, sin embargo la distinción entre vehículos de carga pesados y autobuses sí es importante. Este es un resultado relevante porque relaja los requerimientos del SCT en cuanto a clasificación, aunque obliga a discriminar los autobuses, si bien el sistema ya es capaz de hacerlo.

Por último, se ha comprobado que un incremento del 12% en el número de vehículos gasolina en detrimento de los diesel supone una variación de las emisiones de un 3,1%. Este resultado implica que, para las aplicaciones en las que un error del 3% en los factores de emisión sea admisible, el empleo de los porcentajes de vehículos diesel y gasolina sería suficiente, lo que evita costosos sistemas de imagen y complicados procedimientos para obtener la información del tipo de vehículo (gasolina o diesel) que sería necesaria para el cálculo de los factores de emisión.

#### ▪ **Factores meteorológicos**

Se encontró que la dirección del viento es un factor crítico en el cálculo de las emisiones contaminantes procedentes del tráfico dentro de un área determinada. Sólo en el caso en el que el viento sople en direcciones próximas a la paralela a la carretera se obtenían buenos resultados, es decir, concentraciones apreciables.



Con respecto a la velocidad del viento, se concluye que el modelo en esta configuración sólo tiene utilidad para velocidades bajas que dependen de la dirección del viento: 3 km/h para 137° y 4 km/h para 180°. Por este motivo, para poder calcular experimentalmente las emisiones, es realmente importante disponer de medidas precisas para poder considerar correctamente su influencia en las concentraciones obtenidas a partir del modelo de dispersión.

Estos resultados obligan al uso de estaciones meteorológicas en el lugar donde se desarrolla la campaña de medidas para tener siempre controladas las condiciones meteorológicas y poder descartar las medidas correspondientes a situaciones de viento donde el modelo de dispersión no sea aplicable.

#### ▪ Factores geométricos

Otra conclusión importante se obtiene del análisis de sensibilidad del modelo de dispersión a la longitud del link. Cuando se trata de determinar qué tramo de carretera afecta en las concentraciones medidas en un punto específico de la misma, de los estudios realizados se concluye que el tramo dependerá básicamente de la dirección del viento. Por tanto, una conclusión muy relevante en este aspecto, es que para el cálculo de las emisiones asociadas a un tramo de vía, es necesario medir la dirección del viento para poder saber a qué tramo de vía asignar las emisiones.

También es destacable el resultado obtenido del análisis de la influencia de unos carriles sobre otros porque demuestran la utilidad de añadir sensores de medida de CO a los módulos del sistema SCT para medir valores de concentración, aunque pone de relieve las dificultades para emplear estos sensores para la detección de vehículos altamente contaminantes.



Las conclusiones finales sobre el análisis de sensibilidad del primer escenario de medidas propuesto han llevado a considerar la posibilidad de estudiar otra configuración en la que el modelo de dispersión fuera aplicable en más situaciones.

Con el segundo análisis de sensibilidad se estableció una nueva configuración para los receptores del modelo. La primera conclusión a la que se llegó es que la altura a la que se dispongan los receptores parece ser un parámetro importante para la determinación de la concentración de contaminantes. Concretamente, se obtuvo que para una altura de los receptores de 1 m se consiguen los mejores resultados. Con esta nueva configuración se alcanza además una menor sensibilidad del modelo a la dirección del viento y mayores concentraciones. Sin embargo, estas ventajas sólo se obtenían para direcciones de viento entre 180 y 360°, concluyendo que la configuración óptima consistiría en dos sistemas de receptores situados paralelamente a la carretera para aprovechar al máximo las posibilidades de esta configuración.

El problema de esta nueva configuración surge cuando el viento sopla de manera paralela a la vía en cuestión, ya que los contaminantes procedentes de los vehículos en este caso no son arrastrados hacia la posición en la que se encuentran los receptores. De cualquier modo, en cuanto la dirección del viento deja de ser paralela a la carretera, la nueva configuración propuesta ofrece mejores resultados y aún con vientos paralelos a la carretera es aplicable.

Por último, del estudio de aplicabilidad de la metodología europea EMEP/CORINAIR a escalas espacio-temporales reducidas, se concluye que las emisiones obtenidas resultan ser aceptables dada la comprobación que se realizó utilizando los valores máximos de emisión permitidos según la normativa EURO5 para cada tipo de vehículo.



## ▪ Conclusión final

A la vista de las conclusiones expuestas anteriormente, podemos decir que los objetivos de este proyecto fin de carrera se han conseguido completamente.

Por un lado, la metodología de trabajo empleada en este proyecto ha servido para realizar el análisis de sensibilidad de un modelo de dispersión para su uso en el cálculo experimental de emisiones asociadas al tráfico rodado.

Por otro lado, este análisis ha permitido analizar la idoneidad de la configuración del sistema experimental de medida e incluso proponer una nueva configuración aplicable a un rango más amplio de escenarios.

Además, ha aportado información sobre los requerimientos de los sistemas de medida que se utilizan para recoger los datos experimentales que se utilizarán para el cálculo de las emisiones asociadas a un tramo de vía, que es precisamente lo que le confiere carácter experimental a las emisiones. Es importante destacar este punto porque conviene recordar que el cálculo de emisiones se realiza habitualmente a partir únicamente de estadísticas y porcentajes, lo que conlleva un alto grado de incertidumbre en las emisiones.

Por todos estos motivos se puede decir estos resultados contribuyen muy notablemente al avance de las metodologías del cálculo experimental de las emisiones contaminantes. Sin embargo es necesario recordar que los modelos de dispersión también se utilizan en otros muchos ámbitos, como por ejemplo en las evaluaciones de impacto ambiental de diversas fuentes de contaminación. Por extensión, estos resultados y la metodología de trabajo seguida en este proyecto también pueden repercutir muy positivamente en un futuro en otras áreas de interés medioambiental.







## 9. BIBLIOGRAFÍA

### • Artículos, monografías y otros documentos:

**(ARB, 2007)** ARB: *"EMFAC2007 version 2.30 User's Guide: Calculation emission inventories for vehicles in California"*, Air Resources Board (ARB), 2007.

**(Briz et al, 2009)** Briz S., Ugarte M., Durán I., Rodriguez R.M., De la Serna M., Gali R., Picabea C., Fernández I., De Castro A.J.: *"Metodología y sistema de medida para el cálculo experimental de las emisiones contaminantes asociadas al tráfico rodado"*, IV Congreso de Gestión Medioambiental, 2009

**(Caltrans, 1989)** Caltrans: *"CALINE4- A Dispersion Model For Predicting Air Pollutant Concentrations Near Roadways"*, Informe nº FHWA/CA/TL-84/15. California Department of Transportation (Caltrans), 1989.

**(Caltrans, 1998)** Caltrans: *"User's Guide For CL4: A User-Friendly Interface For The CALINE4 Model For Transportation Project Impact Assessments"*, User's Guide STI-997480-1814-UG. California Department of Transportation (Caltrans), 1998.

**(Castro et al, 1991)** Castro M., González R., Portela A.: *"Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico"*, Física de la Tierra No 3 (103-138), 1991.

**(EEA, 2009)** EEA: *"EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook-2009"*, Technical report No 9/2001, European Environment Agency (EEA), 2009.

**(EEA, 2007)** EEA: *"COPERT 4, Computer programme to calculate emissions from road Transport"* User manual (Version 5.0), 2007.



**(Gali, 2008)** Gali, R.: *"Metodología de cálculo de la tasa de emisión de contaminantes producidos por el tráfico rodado mediante la aplicación de un modelo de dispersión atmosférico"*, Proyecto fin de carrera, 2008.

**(Ganguly, 2008)** Ganguly R., Broderick B.: "Performance evaluation and sensitivity analysis of the general finite line source model for CO concentrations adjacent to motorways: A note", *Transportation Research Part D* 13 (198-205), 2008

**(Härkönen, 2002)** Härkönen J.: *"Regulatory dispersion modeling of traffic-originated pollution"*, Finnish Meteorological Institute Contributions No 38, Helsinki, 2002.

**(Jaimes et al, 1990)** Jaimes de Pino M., Hernández Esquivel L.: *"Determinación de niveles sanguíneos de carboxihemoglobina como función de la exposición al monóxido de carbono en la ciudad de Bogotá"*, *Revista Colombiana de ciencias químico-farmacéuticas* No 18, 1990

**(Levitin et al, 2005)** Levitin J., Härkönen J., Kukkonen J., Nikmo J.: *"Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road"*, *Atmospheric Environment* 39 (2005) 4439-4452, 2005.

**(Lindén et al, 2007)** Lindén J., Thorsson S., Eliasson I.: *"Carbon Monoxide in Ouagadougou, Burkina Faso – A Comparison between Urban Background, Roadside and In-traffic Measurements"*, *Water Air Soil Pollut.* 188 (345-353), 2007

**(Monzón et al, 1999)** Monzón A., Moragues A., Acha C.: *"Seasonal analysis of air pollution levels in Madrid"*, *The Science of the Total Environment* 235 (343-345), 1999.

**(Slezakova et al, 2011)** Slezakova K., Castro D., Begonha A., Delerue-Matos C., Alvim-Ferraz M., Morais S., Pereira M.: *"Air pollution from traffic emissions in Oporto"*,



*Portugal: Health and environmental implications*", Microchemical Journal 99 (51-59), 2011.

**(Sripraparkorn et al, 2003)** Sripraparkorn C., Jinsart W., Hooper M.: "*Application of the CALINE4 air quality model and the TSI DustTrak for the prediction and measurement of roadside particulate matter and carbon monoxide levels in Bangkok*", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment in Phuket, Thailand, 2003.

**(Tapia, 1998)** Tapia Granados J.A.: "*La reducción del tráfico de automóviles: una política urgente de promoción de la salud*", Revista Panamericana de Salud Pública 3(3), 1998.

**(Wilkins, 2006)** Wilkins E.T.: "*Air pollution aspects of the London fog of December 1952*", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 80, pages 267-271, December 2006.

**(Yamartino, 1984)** Yamartino R.J.: "*A comparision of several single-pass estimators of the standard deviation of wind direction*", Journal of Climate and Applied Meteorology 23 (1362-1366), 1984.

## • Legislación

**Normativa Euro 5:** Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2007 sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos.



## • Archivos electrónicos y Páginas Web

**Web [1]:** Web de la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, EPA).

< <http://www.epa.gov/> >

**Web [2]:** Web sobre la calidad del aire en Aragón, promovida por el Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón.

<[http://www.aragonaire.es/moreinfo.php?n\\_action=pollutants&item=2](http://www.aragonaire.es/moreinfo.php?n_action=pollutants&item=2)>

**Web [3]:** Artículo del periódico El País: "*Madrid no consigue reducir la contaminación*", de Elena G. Sevillano. 26/04/2011.

<[http://www.elpais.com/articulo/madrid/Madrid/consigue/reducir/contaminacion/elpepi espmad/20110426elpmad\\_3/Tes](http://www.elpais.com/articulo/madrid/Madrid/consigue/reducir/contaminacion/elpepi espmad/20110426elpmad_3/Tes)>

**Web [4]:** Web de la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible, PTEHPC.

<<http://www.ptehpc.org/>>

**Web [5]:** Artículo del periódico El País: "*La contaminación de los motores diesel eleva la mortalidad en Madrid*", de Elena G. Sevillano. 05/01/2011.

<[http://www.elpais.com/articulo/madrid/contaminacion/motores/diesel/eleva/mortalidad/Madrid/elpepiespmad/20110105elpmad\\_1/Tes](http://www.elpais.com/articulo/madrid/contaminacion/motores/diesel/eleva/mortalidad/Madrid/elpepiespmad/20110105elpmad_1/Tes)>

**Web [6]:** Web Española sobre modelización de la contaminación atmosférica del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

<<http://www.ciemat.es/MCAportal/>>

**Web [7]:** Departamento de Transportes del Estado de California (CALTRANS)

< <http://www.dot.ca.gov/> >



**Web [8]:** NTP 329: Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas. Tabla 2: Condiciones de estabilidad meteorológica de Pasquill.

<[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_329.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_329.pdf)>

**Web [9]:** Junta de Recursos del Aire de California (Air Resources Board, ARB). Release of EMFAC2007.

<[http://arb.ca.gov/msei/onroad/latest\\_version.htm](http://arb.ca.gov/msei/onroad/latest_version.htm)>

**Web [10]:** Nokia Maps

< <http://maps.nokia.com/services/>>

**Web [11]:** Estadísticas de la Dirección General de Tráfico (DGT) para el parque automovilístico por provincia y tipo de carburante.

<[http://www.dgt.es/portal/en/seguridad\\_vial/estadistica/parque\\_vehiculos/por\\_provincia\\_tipo\\_y\\_carburante/](http://www.dgt.es/portal/en/seguridad_vial/estadistica/parque_vehiculos/por_provincia_tipo_y_carburante/)>

**Web [12]:** Agencia Medioambiental Europea (European Environment Agency, EEA)

<<http://www.eea.europa.eu/>>

**Web [13]:** Programa Europeo de Evaluación y Control (European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP)

< <http://www.emep.int/>>

**Web [14]:** EMISIA, perteneciente a la Universidad de Tesalónica. COPERT4

< <http://www.emisia.com/copert/>>

**Web [15]:** Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Datos históricos de observación.

<[http://www.aemet.es/es/servidor-datos/acceso-datos/listado-contenidos/detalles/datos\\_observacion](http://www.aemet.es/es/servidor-datos/acceso-datos/listado-contenidos/detalles/datos_observacion)>



**Web [16]:** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Consumo de combustible (l/100 km) de los vehículos en España.

< <http://www.idae.es/coches/> >

**Web [17]:** Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Logística de los Combustibles.

< <http://www.fenercom.com/pages/publicaciones/libros-y-guias-tecnicas.php> >

**Web [18]:** Web de la Red Meteorológica Municipal del Ayuntamiento de Madrid. Estudio sobre la altura de la mezcla en distintos puntos de la ciudad.

<[http://www.mambiente.madrid.es/opencms/export/sites/default/calaire/Anexos/red\\_meteorologica\\_mpal.pdf](http://www.mambiente.madrid.es/opencms/export/sites/default/calaire/Anexos/red_meteorologica_mpal.pdf)>



## ANEXO I.

### Parque nacional de vehículos distribuido por provincias y tipos. Año 2009

PROVINCIAS	TIPO DE VEHÍCULOS						TOTAL
	CAMIONES Y FURGONETAS	AUTOBUSES	TURISMOS	MOTOCICLETAS	TRACTORES INDUSTRIALES	OTROS VEHÍCULOS	
Álava	32.740	519	146.071	11.328	1.391	4.382	196.431
Albacete	53.502	443	178.362	19.853	3.331	4.080	259.571
Alicante/Alacant	195.419	1.581	889.573	114.393	5.512	12.563	1.219.041
Almería	95.891	675	312.296	36.337	6.383	7.406	458.988
Ávila	26.208	156	83.192	6.533	918	3.476	120.483
Badajoz	76.082	730	336.275	25.417	3.247	7.499	449.250
Balears (Illes)	130.991	2.342	644.979	95.042	2.185	7.329	882.868
Barcelona	527.238	6.206	2.393.478	492.163	16.615	47.464	3.483.164
Burgos	39.137	498	179.636	12.235	3.325	6.066	240.897
Cáceres	61.033	615	199.205	15.506	1.446	6.913	284.718
Cádiz	98.959	1.060	534.450	72.423	3.384	9.162	719.438
Castellón/Castelló	80.557	492	281.562	31.977	3.771	5.713	404.072
Ciudad Real	71.708	466	226.264	19.944	3.853	5.526	327.761
Córdoba	95.618	739	347.406	42.029	3.057	7.182	496.031
Coruña (A)	85.419	1.836	574.234	40.723	4.754	9.607	716.573
Cuenca	37.011	383	102.547	9.320	3.161	3.992	156.414
Girona	115.850	988	373.931	72.600	3.534	10.006	576.909
Granada	112.475	1.132	423.088	75.811	3.642	8.337	624.485
Guadalajara	30.400	248	117.610	12.006	1.501	3.887	165.652
Guipúzcoa	71.268	844	302.256	44.060	3.306	6.441	428.175
Huelva	52.165	684	226.530	20.442	1.813	4.839	306.473
Huesca	38.083	357	108.900	10.908	1.953	4.610	164.811
J León	111.838	516	264.181	28.647	2.908	7.702	415.792
León	59.343	787	246.950	19.847	3.093	6.259	336.279
Lleida	63.523	521	211.098	24.982	4.275	7.216	311.615
Rioja (La)	41.668	248	131.766	12.166	1.752	4.106	191.706
Lugo	41.094	911	187.937	13.534	2.867	4.873	251.216
Madrid	643.687 15,10%	11.469 0,27%	3.277.367 76,88%	267.860 6,28%	17.299 0,41%	45.530 1,07%	4.263.212 100%
Málaga	171.850	1.545	733.852	111.909	3.961	12.744	1.035.861
Murcia	162.410	1.818	683.203	84.840	11.896	11.060	955.227
Navarra	82.087	950	294.293	27.206	4.510	9.282	418.328
Ourense	38.866	619	175.769	12.494	1.587	3.827	233.162
Asturias	92.320	1.307	493.893	41.624	4.657	12.578	646.379
Palencia	18.114	277	85.038	6.019	1.561	2.498	113.507
Palmas (Las)	176.355	2.563	487.162	47.954	2.519	10.154	726.707
Pontevedra	82.036	1.344	496.490	51.546	4.487	11.399	647.302
Salamanca	36.377	525	166.574	12.531	1.515	3.732	221.254
Santa Cruz de Tenerife	179.376	2.938	487.830	46.763	2.230	9.263	728.400
Cantabria	57.806	630	281.589	29.686	3.652	6.300	379.663
Segovia	22.012	273	83.697	6.249	1.308	2.902	116.441
Sevilla	153.139	2.108	878.989	103.598	8.078	14.961	1.160.873
Soria	14.650	101	46.114	3.699	959	1.976	67.499
Tarragona	105.979	956	368.146	55.734	4.183	10.490	545.488
Teruel	36.285	175	75.950	5.975	1.391	2.640	122.416
Toledo	96.338	815	333.132	26.175	4.034	9.582	470.076
Valencia/València	255.123	2.509	1.205.131	159.440	16.176	19.519	1.657.898
Valladolid	42.032	594	248.199	22.814	2.984	5.070	321.693
Vizcaya	90.946	1.643	495.067	40.612	4.050	10.628	642.946
Zamora	23.322	245	94.942	7.252	1.227	2.898	129.886
Zaragoza	91.601	1.158	388.257	41.378	5.310	10.495	538.199
Ceuta	7.334	67	40.596	8.451	71	585	57.104
Melilla	10.949	57	38.428	4.639	108	614	54.795
<b>TOTAL</b>	<b>5.136.214</b>	<b>62.663</b>	<b>21.983.486</b>	<b>2.606.674</b>	<b>206.730</b>	<b>447.363</b>	<b>30.443.130</b>

Fuente cifras de población: INE. Estimaciones de la población actual de España a 1de enero de 2009 (Fuente utilizada por Eurostat)







## ANEXO II.

### Parque nacional de vehículos distribuido por Comunidades Autónomas, tipos y carburantes. Año 2009

COMUNIDADES AUTÓNOMAS	CAMIONES Y FURGONETAS				AUTOBUSES				TURISMOS			
	GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL	GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL	GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
Andalucía	93.032	798.866	37	891.935	91	8.344	24	8.459	1.687.504	2.033.053	235	3.720.792
Aragón	18.786	147.156	27	165.969	30	1.657	3	1.690	288.819	284.236	52	573.107
Asturias (Principado de)	10.047	82.268	5	92.320	16	1.291	0	1.307	218.722	275.133	38	493.893
Baleares (Illes)	27.228	103.757	6	130.991	50	2.280	12	2.342	445.998	198.944	37	644.979
Canarias	71.952	283.772	7	355.731	95	5.406	0	5.501	834.043	140.931	18	974.992
Cantabria	5.016	52.785	5	57.806	10	620	0	630	123.398	158.087	104	281.589
Castilla y León	33.729	247.398	68	281.195	23	3.392	41	3.456	599.598	634.571	173	1.234.342
Castilla-La Mancha	31.336	257.617	6	288.959	25	2.319	11	2.355	397.162	560.715	38	957.915
Cataluña	118.728	693.269	593	812.590	150	8.380	141	8.671	1.814.921	1.531.406	326	3.346.653
Comunitat Valenciana	60.608	470.441	50	531.099	64	4.492	26	4.582	1.189.222	1.186.885	159	2.376.266
Extremadura	16.257	120.856	2	137.115	18	1.327	0	1.345	246.869	288.583	28	535.480
Galicia	22.347	225.058	10	247.415	44	4.662	4	4.710	566.069	868.241	120	1.434.430
Madrid (Comunidad de)	67.356	576.063	268	643.687	160	11.113	196	11.469	1.510.552	1.766.538	277	3.277.367
Murcia (Región de)	12.678	149.726	6	162.410	24	1.792	2	1.818	285.717	397.444	42	683.203
Navarra (Comunidad Foral de)	9.698	72.386	3	82.087	10	940	0	950	133.659	160.591	43	294.293
País Vasco	19.276	175.533	145	194.954	25	2.980	1	3.006	448.496	492.816	2.082	943.394
Rioja (La)	4.280	37.387	1	41.668	4	244	0	248	63.169	68.573	24	131.766
Ceuta y Melilla	3.080	15.203	0	18.283	0	124	0	124	46.737	32.287	0	79.024
<b>TOTAL GENERAL</b>	<b>625.434</b>	<b>4.509.541</b>	<b>1.239</b>	<b>5.136.214</b>	<b>839</b>	<b>61.363</b>	<b>461</b>	<b>62.663</b>	<b>10.900.655</b>	<b>11.079.034</b>	<b>3.796</b>	<b>21.983.485</b>

MOTOCICLETAS				TRACTORES INDUSTRIALES				OTROS VEHICULOS				TOTAL GENERAL			
GASOLINA	GAS-OIL	OTROS	TOTAL	GASOLINA	GAS-OIL	OTROS	TOTAL	GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL	GASOLINA	GAS - OIL	OTROS	TOTAL
490.775	343	78	491.196	273	32.950	3	33.226	24.976	45.484	1.873	72.333	2.296.651	2.919.040	2.250	5.217.941
58.177	72	12	58.261	64	8.590	0	8.654	4.098	12.800	847	17.745	369.974	454.511	941	825.426
41.520	88	16	41.624	60	4.597	0	4.657	3.572	8.532	474	12.578	273.937	371.909	533	646.379
94.801	79	162	95.042	65	2.119	1	2.185	1.554	5.604	171	7.329	569.696	312.783	389	882.868
94.646	50	21	94.717	89	4.660	0	4.749	5.221	13.869	327	19.417	1.006.046	448.688	373	1.455.107
29.621	43	22	29.686	22	3.630	0	3.652	2.102	3.965	233	6.300	160.169	219.130	364	379.663
97.018	146	15	97.179	98	16.784	8	16.890	10.006	23.399	1.472	34.877	740.472	925.690	1.777	1.667.939
87.197	84	17	87.298	110	15.769	1	15.880	9.580	16.701	786	27.067	525.410	853.205	859	1.379.474
644.896	402	181	645.479	376	28.229	2	28.607	23.515	47.393	4.268	75.176	2.602.586	2.309.079	5.511	4.917.176
305.268	247	295	305.810	216	25.239	4	25.459	8.569	27.141	2.085	37.795	1.563.947	1.714.445	2.619	3.281.011
40.886	31	6	40.923	45	4.648	0	4.693	4.257	9.719	436	14.412	308.332	425.164	472	733.968
118.182	98	17	118.297	87	13.607	1	13.695	7.237	20.291	2.178	29.706	713.966	1.131.957	2.330	1.848.253
267.543	216	101	267.860	163	17.133	3	17.299	13.133	30.458	1.939	45.530	1.858.907	2.401.521	2.784	4.263.212
84.646	173	21	84.840	80	11.816	0	11.896	3.663	7.091	306	11.060	386.808	568.042	377	955.227
27.181	20	5	27.206	27	4.483	0	4.510	1.696	7.171	415	9.282	172.271	245.591	466	418.328
95.901	81	18	96.000	64	8.683	0	8.747	4.874	15.697	880	21.451	568.636	695.790	3.126	1.267.552
12.135	27	4	12.166	18	1.734	0	1.752	964	2.979	163	4.106	80.570	110.944	192	191.706
13.084	6	0	13.090	3	176	0	179	540	649	10	1.199	63.444	48.445	10	111.899
<b>2.603.477</b>	<b>2.206</b>	<b>991</b>	<b>2.606.674</b>	<b>1.860</b>	<b>204.847</b>	<b>23</b>	<b>206.730</b>	<b>129.557</b>	<b>298.943</b>	<b>18.863</b>	<b>447.363</b>	<b>14.261.822</b>	<b>16.155.934</b>	<b>25.373</b>	<b>30.443.129</b>